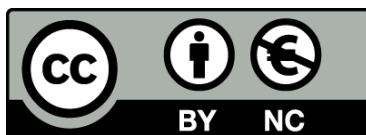




UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Fisiologia femenina i rendiment esportiu: biomecànica muscular, susceptibilitat a les lesions i capacitat aeròbica

Cristina Rotllan Serra



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial 4.0. Espanya de Creative Commons**.

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial 4.0. España de Creative Commons**.

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0. Spain License**.

***Fisiologia femenina i rendiment esportiu:
biomecànica muscular, susceptibilitat a
les lesions i capacitat aeròbica***

Cristina Rotllan Serra

Grup de Fisiologia Adaptativa: Hipòxia, Exercici i Salut

Secció de Fisiologia

Departament de Biologia Cel·lular, Fisiologia i Immunologia

Facultat de Biologia

Universitat de Barcelona

2025



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Facultat de Biologia

Departament de Biologia Cel·lular, Fisiologia i Immunologia

Programa de Doctorat en Biomedicina

Fisiologia femenina i rendiment esportiu: biomecànica muscular, susceptibilitat a les lesions i capacitat aeròbica

Memòria presentada per **Cristina Rotllan Serra**, per optar al grau de

Doctora per la Universitat de Barcelona

Doctorand/a

A stylized, handwritten signature in red ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Cristina Rotllan Serra

Director i tutor
Ginés Viscor Carrasco

Directora
Laura Esquiús de la Zarza

*Als meus pares Josep i Dolors,
pel seu amor incondicional*

Agraïments

Agraeixo profundament als meus directors, el doctor Ginés Viscor i la doctora Laura Esquius pel vostre temps, acompanyament, dedicació i ensenyances. No tinc paraules per poder definir la gratitud que tinc cap a vosaltres per la confiança que m'heu donat i per creure en el projecte des del primer dia.

Al doctor Casimiro Javierre pel seu temps, paciència i ajuda per la realització dels experiments.

Al Marc, Jan i Adrià pel vostre ajut i col·laboració passant les hores al laboratori i en alçada.

A totes les participants, ciclistes, corredores, remeres. Sense vosaltres no hauria estat possible. Moltes gràcies per la confiança.

Agraeixo a tot l'staff tècnic de la Federació Catalana i Espanyola de Rem que heu fet possible i heu facilitat els experiments.

A tot l'staff mèdic, tècnic i jugadores de l'UniGirona pel temps, confiança i participació en el meu projecte.

A l'eHealthCenter de la UOC per suport econòmic que he rebut que ha estat fonamental per el desenvolupament de la recerca.

A tots els companys del AME2P Laboratoire de la Université Clermont Auvergne, especialment a la Laurie per obrir-me les portes des del primer dia i per la confiança, graciés també al David, Camile, Baptiste, Alexie, Sarah... Diuen que les casualitats no existeixen, i serà veritat, ja que sense saber-ho vaig anar a parar a la ciutat on Blaise Pascal va demostrar que la pressió atmosfèrica disminuïa amb l'altitud, tot pujant i baixant del fantàstic Puy de Dôme.

A totes les persones que heu donat suport als projectes que finalment no han pogut materialitzar-se.

A tota la meua família pel recolzament i la comprensió.

A la meva estimada germana Maria, pel seu amor incondicional.

Als meus pares que em van deixar somiar...

I a en Dani, el meu company de vida i d'aventures, el teu suport ha travessat fronteres, gràcies per tant, sense tu no hagués estat possible.

I fins aquí, amb aquesta tesi passo una pàgina...s'acaba una etapa que va començar fa mooolts anys, molt abans dels anys de doctorat, del màster, els graus i la diplomatura...la curiositat i les ganes d'aprendre han estat el motor del viatge quan no tenia destí. Comença una nova vida.

Taula de contingut

RESUM I PARAULES CLAU	16
ABSTRACT AND KEYWORDS	22
LLISTA DE TAULES I FIGURES	28
ABREVIATURES	34
ESTRUCTURA	41
CONTEXTUALITZACIÓ	46
INTRODUCCIÓ	52
1. Fisiologia femenina.....	54
1.1. Etapes de la vida hormonal femenina.....	54
1.1. Sistema hormonal femení.....	54
1.2. Fisiologia del cicle menstrual.....	56
2. El cicle menstrual en l'àmbit de la recerca	61
2.1. El cicle menstrual com a cinquè signe vital	61
2.2. El cicle menstrual en les ciències de l'esport.....	63
2.3. Definint un cicle menstrual normal	66
2.4. Factors que influencien els nivells d'estrògens i progesterona.....	74
3. Principals irregularitats del cicle menstrual en les atletes femenines.....	75
3.1. Irregularitats severes	76
3.2. Irregularitats subtils	77
3.3. Irregularitats en funció del tipus d'esport	78
3.4. De la triada de l'atleta femenina al REDs	79
4. L'ús d'anticonceptius hormonaals en les atletes femenines	81
5. Efectes fisiològics de les hormones femenines	85
5.1. Efectes fisiològics del 17 β -estradiol.....	85
5.2. Efectes fisiològics de la progesterona	91
6. Cicle menstrual i rendiment esportiu.....	96
6.1. Propietats mecàniques del múscul	99
6.2. Risc de lesions	100
6.3. Resposta cardiovascular	101
6.4. Resposta a la hipòxia.....	102
6.5. Capacitat aeròbica.....	104
HIPÒTESIS I OBJECTIUS	108
MATERIAL I MÈTODES	114

1. SECCIÓ I: Resposta muscular en una cursa ciclista femenina	116
1.1. Participants	116
1.2. Propietats musculars no invasives	116
1.3. Disseny de l'estudi	118
1.4. Anàlisi estadística	120
2. SECCIÓ II: Efectes del cycle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica	122
2.1. Participants	122
2.2. Determinació del cycle menstrual	123
2.3. Hipòxia hipobàrica aguda	124
2.4. Disseny de l'estudi	124
2.5. Anàlisi estadística	127
3. SECCIÓ III: Efectes dels anticonceptius hormonal en el rendiment aeròbic-anaeròbic	128
3.1. Participants	128
3.2. Determinació del perfil hormonal	129
3.3. Disseny d'estudi.....	130
3.4. Anàlisi estadística	131
RESULTATS	134
1. SECCIÓ I: Resposta muscular en una cursa ciclista femenina	136
1.1. Propietats musculars abans i després de les competicions	136
1.2. Propietats musculars basals.....	138
2. SECCIÓ II: Efectes del cycle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica	141
2.1. Espirometria	141
2.2. Respostes cardiorespiratòries durant l'exercici a alta altitud	142
2.3. Pressió sanguínia i freqüència cardíaca de recuperació després de l'exercici..	145
2.4. Control de l'equilibri corporal	145
2.5. Síntomes del cycle menstrual i l'impacte en el rendiment esportiu	146
3. SECCIÓ III: Efectes dels anticonceptius hormonal en el rendiment aeròbic-anaeròbic	149
3.1. Lactat	150
3.2. Freqüència cardíaca.....	151
3.3. Potència	151
DISCUSSIÓ	154
1. SECCIÓ I: Resposta muscular en una cursa ciclista femenina	156
1.1. Estrès psicològic	156

1.2. Fatiga neuromuscular	157
2. SECCIÓ II: Efectes del cicle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica	163
2.1. Espirometria	163
2.2. Pressió sanguínia i freqüència cardíaca de recuperació després de l'exercici..	164
2.3. Respostes cardiorespiratòries durant l'exercici a alta altitud	164
2.4. Control de l'equilibri corporal	166
2.5. Síntomes del cicle menstrual i l'impacte en el rendiment esportiu	168
3. SECCIÓ III: Efectes dels anticonceptius hormonal en el rendiment aeròbic-anaeròbic	171
3.1. Potència anaeròbica.....	171
3.2. Rendiment aeròbic.....	172
DISCUSSIÓ GENERAL.....	175
CONCLUSIONS.....	184
CONCLUSIONS.....	190
BIBLIOGRAFIA	196
APÈNDIXS.....	227

RESUM I PARAULES CLAU

Resum

En les últimes dècades, la participació de les dones en la pràctica esportiva ha augmentat considerablement, tant a nivell amateur com professional. Aquest increment ha anat acompanyat d'un interès creixent per comprendre les implicacions de la fisiologia femenina en les respostes i adaptacions a l'exercici físic. Històricament, la recerca en ciències de l'esport ha patit un biaix androcèntric, ja que la majoria d'estudis s'han realitzat en població masculina, i els resultats s'han extrapolat a les dones sense tenir en compte les seves particularitats fisiològiques ni les fluctuacions hormonals que es produeixen al llarg de la vida d'una dona. Com a conseqüència, encara no existeixen guies específiques sobre la pràctica d'exercici físic, la prevenció ni la recuperació de lesions adaptades al sexe femení. Fins que les implicacions de les fluctuacions hormonals femenines en el rendiment esportiu no siguin millor compreses i integrades en la recerca i l'entrenament, les dones no podran assolir tot el seu potencial esportiu.

La heterogeneïtat dels estudis recents i les diferències en els resultats han posat de manifest les limitacions metodològiques de la recerca sobre els efectes del cicle menstrual en l'exercici físic i el rendiment esportiu. Entre els principals punts febles s'inclouen la variabilitat en les metodologies emprades, els diferents dissenys experimentals i la manca de consens en la definició de les fases del cicle menstrual, fet que dificulta l'obtenció de conclusions sòlides i generalitzables.

Amb l'objectiu d'ampliar el coneixement sobre la fisiologia femenina en el rendiment esportiu, inicialment es va dur a terme un estudi observacional en què es va analitzar la resposta muscular al llarg d'una setmana de competició en una cursa ciclista femenina, amb participants que presentaven cicles menstruals naturals. Amb la finalitat d'analitzar de manera més precisa els efectes de les fluctuacions hormonals al llarg de les diferents fases del cicle menstrual sobre el rendiment esportiu, es va millorar la metodologia per a l'establiment del perfil hormonal, incorporant tests d'orina per detectar l'augment de l'hormona luteïnitant i determinar així el moment de l'ovulació. En aquest context, es va dissenyar un estudi experimental controlat amb dones eumenorreiques, en el qual

es van estudiar les respostes cardiorespiratòries a un test submàxim i el control postural en condicions d'hipòxia hipobàrica. Finalment, amb la intenció d'explorar els efectes d'un altre perfil hormonal, es va analitzar el rendiment aeròbic i la potència anaeròbica en un grup d'esportistes d'elit que utilitzaven anticonceptius hormonaals.

Els resultats van mostrar canvis significatius de les propietats musculars al llarg d'una setmana de competició ciclista professional, es va observar una disminució del to i la rigidesa muscular, possiblement atribuïble a una major fatiga neuromuscular post-competició i a l'estrès pre-competitiu. En particular, es va detectar un increment en la rigidesa del múscul *rectus femoris* després de la cursa, la qual cosa podria augmentar la susceptibilitat a lesions per sobrecàrrega en aquest múscul. D'altra banda, l'anàlisi del rendiment aeròbic en condicions d'hipòxia hipobàrica no va mostrar diferències significatives entre les fases del cicle menstrual. No obstant això, es van observar canvis estadísticament significatius en el volum corrent i en la saturació d'oxigen arterial entre fases del cicle menstrual, probablement deguts a l'efecte estimulant de la progesterona sobre la ventilació i un patró respiratori femení. Finalment, en el grup d'esportistes que utilitzaven anticonceptius hormonaals, no es van observar alteracions significatives ni en el rendiment aeròbic ni en la potència anaeròbica, la qual cosa suggereix que aquest tipus de perfil hormonal no afecta de manera rellevant el rendiment en aquestes variables.

Paraules clau

Atletes femenines, cicle menstrual, anticonceptius hormonaals, rendiment esportiu, lesions, resposta muscular, resposta cardiorespiratòria.

ABSTRACT AND KEYWORDS

Abstract

In recent decades, women's participation in sports has increased significantly, both at amateur and professional levels. This increase has been accompanied by a growing interest in understanding the implications of female physiology on responses and adaptations to physical exercise. Historically, research in sports science has suffered from a male-centered bias, as most studies have been conducted in male populations, with results often extrapolated to women without considering their physiological specificities or the hormonal fluctuations that occur throughout a woman's life. As a result, specific guidelines for physical exercise, injury prevention, or recovery tailored to the female sex are still lacking. Until the implications of female hormonal fluctuations on sports performance are better understood and integrated into research and training, women will not be able to reach their athletic potential fully.

The heterogeneity of recent studies and the variability in findings have highlighted the methodological limitations in the research on the effects of the menstrual cycle on physical exercise and performance. Among the main weaknesses are inconsistencies in methodologies, differences in experimental designs, and a lack of consensus on defining menstrual cycle phases, all of which hinder the ability to draw solid and generalizable conclusions.

To expand knowledge on female physiology in sports performance, an observational study was carried out, analysing muscular responses throughout a week-long competition in a women's cycling race, with participants exhibiting natural menstrual cycles. In order to more accurately assess the effects of hormonal fluctuations across the different phases of the menstrual cycle on athletic performance, the methodology was improved to establish hormonal profiling, incorporating urine tests to detect the surge in luteinizing hormone and thus determine the moment of ovulation. Within this context, a controlled experimental study was conducted with eumenorrheic women, in which cardiorespiratory responses during a submaximal test and postural control under hypobaric hypoxia conditions were examined. Finally, to explore the effects of an alternative hormonal

profile, aerobic performance and anaerobic power were analysed in a group of elite athletes using hormonal contraceptives.

The results revealed a reduction in muscle tone and stiffness during the cycling competition, potentially attributable to increased neuromuscular fatigue post-competition and pre-competitive stress. In particular, there was a post-race increase in the stiffness of the rectus femoris, which may elevate the risk of overuse injuries in this specific muscle. On the other hand, the analysis of aerobic performance under hypobaric hypoxia did not show significant differences across the menstrual cycle phases. However, statistically significant changes were found in tidal volume and arterial oxygen saturation between menstrual cycle phases, possibly due to the stimulatory effect of progesterone on respiration and the female respiratory pattern. Finally, in the group of athletes using hormonal contraceptives, no significant changes were observed in aerobic performance or anaerobic power, suggesting that this hormonal profile does not notably affect these performance variables.

Keywords

Female athletes, menstrual cycle, hormonal contraceptives, sports performance, injuries, muscle response, cardiorespiratory response.

LLISTA DE TAULES I FIGURES

Taula 1. Problemàtiques de salut i les relacions amb el cicle menstrual.	62
Taula 2. Proposta de fases del cicle menstrual en funció de les concentracions hormonals.....	67
Taula 3. Nivells hormonals en sèrum sanguini.	68
Taula 4. Irregularitats del cicle menstrual en atletes femenines.	76
Taula 5. Concentracions hormonals d'anticonceptius hormonals.	84
Taula 6. Característiques antropomètriques i experiència competitiva.	116
Taula 7. Disseny de l'estudi	119
Taula 8. Paràmetres de la intensitat de l'exercici	120
Taula 9. Característiques antropomètriques	123
Taula 10. Característiques del cicle menstrual	124
Taula 11. Característiques antropomètriques.	129
Taula 12. Tipus d'anticonceptius hormonals.....	129
Taula 13. To muscular, resistència i elasticitat abans després de les competicions.	138
Taula 14. To muscular, resistència i elasticitat durant els 5 dies de competicions.....	139
Taula 15. Resultats de l'espirometria forçada en descans.	142
Taula 16. Respostes cardiorespiratòries a diferents intensitats d'exercici en condicions d'hipòxia hipobàrica.....	143
Taula 17. Resultats de l'equilibri corporal en condicions d'hipòxia hipobàrica.	146
Taula 18. Resultats del qüestionari CVM-22.....	147
Taula 19. Resultats comparatius entre les fases del cicle induït per anticonceptius hormonals.....	150

Figura 1. Regulació per retroalimentació de l'eix hipotalàmic-pituïtari-ovàric.....	56
Figura 2. Fases i hormones del cicle menstrual.....	60
Figura 3. Fluctuacions de les hormones femenines al llarg del cicle menstrual	69
Figura 4. Variabilitat de longitud de cicles menstruals.	70
Figura 5. Variabilitat de concentracions hormonals en cicles de 28 dies	71
Figura 6. Irregularitats severes i subtils del cicle menstrual	78
Figura 7. Models conceptuals del REDs en la salut i el rendiment	80
Figura 8. Fases hormonals induïdes per anticonceptius orals.....	82
Figura 9. Efectes fisiològics del 17 β -estradiol	88
Figura 10. Efectes fisiològics de la progesterona	95
Figura 11. Portada de l'assaig científic "The question of rest for women during menstruation"	97
Figura 12. Components del rendiment físic que es poden veure afectats pel cicle menstrual.....	99
Figura 13. Tècnica de l'exploració amb el MyotonPRO®	118
Figura 14. Disseny de l'estudi.....	125
Figura 15. Canvis en les propietats musculars abans i després de les competicions	137
Figura 16. Evolució de la rigidesa del múscul rectus femoris i l'elasticitat del múscul vastus lateralis al llarg dels 5 dies de competició.	140
Figura 17. Respostes cardiorespiratòries en condicions d'hipòxia hipobàrica.	144
Figura 18. Relació de símptomes en les fases del cicle menstrual.	148
Figura 19. Impacte negatiu dels símptomes en el rendiment esportiu.....	148

ABREVIATURES

ACOG: Associació Americana Obstetrícia i Ginecologia

ACSM: American College of Sports Medicine

AH: Anticonceptius Hormonals

AO: Anticonceptiu Oral

AOC: Anticonceptiu Oral Combinat

ATP: Adenosinatrifosfat

BF: *Biceps Femoris*

C1: Competició 1

C2: Competició 2

CM: Cicle Menstrual

CoP: *Centre of Pressure*

CR: Coeficient de Risc

CVM: Contracció Voluntària Màxima

CVM-22: Qualitat de la Vida Menstrual

E1: Estrona

E2: 17 β -Estradiol

E3: Estriol

EMG: Electromiografia

F_IO₂: Fracció d'Oxigen Inspirat

F: Fase Follicular

FC: Freqüència Cardíaca

FC max: Freqüència Cardíaca màxima

FEF25-75: *Forced Expiratory Flow Between 25% and 75% of Forced Vital Capacity*

FET: *Forced Expiratory Time*

FEV1: *Forced Expiratory Volume in the First Second*

FEV1/FVC: *Forced Expiratory Volume in the First Second/Forced Vital Capacity Ratio*

FAH: Fase Activa Hormonal

FNAH: Fase No Activa Hormonal

FIVC: *Forced Inspiratory Volume Capacity*

FVC: *Forced Vital Capacity*

GnRH: Hormona Alliberadora de Gonadotropines

HDL: *High-Density Lipoprotein*

HH: Hipòxia Hipobàrica

Abreviatures

HPO: Hipotalàmic-Pituïtari-Ovàric

IGF-1: *Insulin-like Growth Factor 1*

IOC: *International Olympic Committee*

LCR: Líquid Cefalorraquidi

LEA: Lligament Encreuat Anterior

LEA: *Low Energy Availability*

LH: *Luteinizing Hormone*

LDL: *Low Density Lipoprotein*

L: Fase Lúcia

LG: *Lateral Gastrocnemius*

LOX: lisil oxidasa

MG: *Medial Gastrocnemius*

NM: Nivell del Mar

O₂: Oxigen

ON: Òxid Nítric

P4: Progesterona

PO₂: Pressió Parcial d'Oxígen

PiO₂: Pressió Parcial d'Oxigen Inspirat

P4/E2: *Progesterona / Estradiol Ratio*

PEF: *Peak Expiratory Flow*

PIF: *Peak Inspiratory Flow*

PS: Pressió Sanguínia

Q̇: Cabal Cardíac

RCH: Resposta Cardíaca Hipòxica

REDs: Relative Energy Deficiency in Sports

REP: Rang Esforç Percebut

RER: *Respiratory Exchange Ratio*

RF: *Rectus Femoris*

RVH: Resposta Ventilatòria Hipòxica

SaO₂: Saturació d'Oxigen Arterial

SPM: Síndrome Premenstrual

TMG: Tensiomiografia

UCI: Unió Ciclista Internacional

UO: Ulls Oberts

UT: Ulls Tancats

$\dot{V}_E$: Ventilació Pulmonar

$\dot{V}O_2$ max: Consum Màxim d'Oxigen

VFC: Variabilitat de la Freqüència Cardíaca

VL: *Vastus Lateralis*

VM: *Vastus Medialis*

W: *Watts*

95% IC: Interval de Confiança del 95%

Nota: L'abreviatura LEA es fa servir amb dos significats diferents en aquest treball. El context n'indica el significat corresponent.

ESTRUCTURA

La tesi doctoral presentada s'estructura en diferents apartats tal com s'explica a continuació:

Contextualització: s'hi descriu el context històric i actual de la presència de la dona en el món de l'esport. D'una banda la seva presència com a esportista activa i també com a població d'estudi per tal de comprendre les característiques del sexe femení i la fisiologia hormonal femenina.

Introducció: aquesta secció presenta el marc teòric del treball, centrat en la fisiologia femenina i el paper del cicle menstrual en la recerca. Es descriuen els principals perfils hormonals i els seus efectes potencials sobre els sistemes fisiològics implicats en l'exercici físic. També s'aborda la influència de les fases del cicle menstrual en el rendiment esportiu.

Material i Mètodes, Resultats i Discussió: aquests tres apartats s'han estructurat en tres seccions independents, cadascuna corresponent a un estudi experimental realitzat durant el doctorat. Les dos primeres seccions han donat lloc a dos publicacions científiques, les quals es presenten com a resultats dels treballs desenvolupats al llarg de la recerca.

- **SECCIÓ I:** aquest bloc es centra en la resposta muscular al llarg d'una cursa ciclista femenina.

En aquest primer bloc es va observar com les propietats musculars en el sexe femení es veien afectades durant la competició ciclista en dones amb cicles menstruals naturals. Davant les limitacions metodològiques detectades en aquest estudi, es va optar per optimitzar el disseny de recerca, millorant la determinació de les fases tant del cicle menstrual com del cicle hormonal induït per l'ús d'anticonceptius hormonals, amb l'objectiu d'analitzar de manera més acurada els seus efectes sobre el rendiment esportiu.

- **SECCIÓ II:** aquest bloc es centra en els efectes del cicle menstrual en les respostes cardiorespiratòries i el control postural en condicions d'hipòxia hipobàrica sense aclimatació prèvia a la altitud.

- **SECCIÓ III:** aquest bloc es centra en els efectes del cicle hormonal induït per anticonceptius en la potència anaeròbica i el rendiment aeròbic.

Conclusions: en aquest apartat es recullen les principals conclusions generals derivades del conjunt d'estudis que conformen la tesi doctoral, posant de relleu les aportacions més rellevants i les implicacions dels resultats obtinguts.

Bibliografia: s'hi recullen les referències bibliogràfiques citades al text.

Apèndixs: s'hi adjunten les publicacions en revistes científiques derivades, complementant el contingut de la tesi.

CONTEXTUALITZACIÓ

Per primera vegada a la història en els Jocs Olímpics i Paralímpics de París del 2024 es va arribar a la paritat de gènere en la comunitat d'esportistes. Tot i el creixent nombre de dones i nenes en la pràctica esportiva, tant professional com amateur, la representació del gènere femení en les ciències de l'esport encara no és igualitària. Tan sols el 34 % de la població en estudis publicats en revistes especialitzades en exercici i esport són dones i el 6% dels estudis inclou dones únicament (Cowley et al., 2021). Històricament, la recerca s'ha basat en estudis realitzats en els homes i posteriorment s'han extrapolat els resultats a les dones. Aquesta tendència ha provocat una manca de coneixement, específicament en relació a la fisiologia hormonal femenina i els seus efectes en funcions i processos biològics. Fins que els efectes de les hormones femenines, tant el cicle menstrual com els anticonceptiu hormonal, no siguin clars, les dones no podran aconseguir el seu màxim rendiment esportiu.

Actualment les regles del joc estan canviant, les organitzacions estatals i internacionals han apostat no només per polítiques que conscienciïn a la comunitat de la importància d'un estil de vida saludable, incloent la pràctica d'exercici físic, sinó també la perspectiva de gènere en la recerca biomèdica. Aquests objectius corresponen al número 3 i 5 de l'Agenda 2030 del desenvolupament sostenible de les Nacions Unides (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2020).

Aquesta tesi se centra en els efectes del sexe femení i la fisiologia de les hormones sexuals femenines. És important destacar que, tot i que en alguns moments utilitzem la paraula "dona" al llarg de la tesi i en les publicacions, en cap cas ens estem referint a la seva identitat de gènere. Ens basem en el perfil hormonal, relacionat amb les concentracions hormonals ovàriques. En cap moment hem preguntat pel seu gènere ni podem confirmar si s'identifiquen com a cisgènere (identificades amb el gènere assignat al néixer) o com a persones transgènere (amb una diversitat d'identitats).

El sexe fa referència a la biologia, als trets físics que diferencien els fenotips femenins i masculins, així com la genètica del sexe. El gènere, en canvi, fa referència

a les identitats, normes i relacions socioculturals que estructurin les actituds i comportaments. Aquestes no són fixes ni universals, sinó que depenen de l'entorn cultural i del procés de socialització. Tot i que sexe i gènere són conceptes diferents, interaccionen entre si i cal considerar-los en la recerca biomèdica (Solans-Domènech & Saborit, 2022).

INTRODUCCIÓ

1. Fisiologia femenina

1.1. Etapes de la vida hormonal femenina

Al llarg de la vida d'una dona, les hormones femenines circularan en diferents concentracions des de la pubertat fins a la menopausa, passant pels anys fèrtils on tindran una major rellevància. La pubertat s'inicia amb l'activació de la cascada hormonal de l'eix hipotàlem-hipòfisi-gonadal provocant un creixement físic i maduració sexual i per tant la capacitat reproductiva (Hoyt & Falconi, 2015). Els anys fèrtils comencen amb la menarquia, la primera menstruació, entre els 11 i 15 anys quan les hormones sexuals femenines fluctuaran de manera rítmica cada mes, és el que s'anomena cicle sexual femení o cicle menstrual (CM) (Hall & Hall, 2021). Posteriorment, al voltant dels 40 anys, durant la perimenopausa definida com l'etapa prèvia a la menopausa, s'observen uns canvis endocrins i biològics que es poden evidenciar amb CM irregulars i canvis en el flux menstrual (Hale & Burger, 2009). Aquesta etapa indica l'inici de l'aturada ovàrica on la reducció del nivell dels estrògens circulants pot anar acompanyada de signes clínics com els fogots, ansietat, depressió o insomni (Hachul et al., 2023). Els nivells hormonals disminuiran progressivament amb cicles irregulars fins a la desaparició dels CM, aquest procés de transició pot variar entre 6 i 8 anys (Treloar et al., 1967). L'absència de la menstruació durant 12 mesos seguits ens indicarà l'arribada de la menopausa, que pot aparèixer entre els 45 i 55 anys (Ko & Kim, 2020).

1.1. Sistema hormonal femení

El sistema hormonal femení, al igual que el masculí, està format per tres grups d'hormones que s'alliberen en cascada (Hall & Hall, 2021):

- **L'hormona alliberadora de gonadotropina (GnRH)**: alliberada per l'hipotàlem.

- **Les hormones adenohipofisàries o gonadotropines:** la *follicle-stimulating hormone* (FSH) i *luteinizing hormone* (LH), s'alliberen per l'adenohipòfisi, en resposta a la GnRH.
- **Les hormones ovàriques:** la progesterona (P4) i els estrògens (17 β -estradiol (E2), estrona (E1) i estriol (E3)), dels que l'E2 és el més abundant i principal en l'edat fèrtil, s'alliberen en els ovaris en resposta a les hormones adenohipofisàries.

Aquesta cascada d'hormones és el que s'anomena eix hipotalàmic-hipofisiari-gonadal o eix hipotalàmic-pituïtari-ovàric (HPO) i és l'encarregat de controlar l'alliberació d'aquests grups d'hormones de manera precisa, quantitativa i temporal al llarg del CM. El desenvolupament puberal i la funció reproductiva són regulats per l'eix HPO que comença a activar-se en les nenes d'entre 9 i 12 anys quan la hipòfisis comença a alliberar les hormones adenohipofisàries, de manera incremental, culminant amb l'inici del primer cicle sexual, és a dir amb l'arribada de la primera menstruació (Hall & Hall, 2021). En el nucli infundibular de la regió medi basal de l'hipotàlem és on la GnRH té un alliberament pulsatiu en períodes de 5 a 25 minuts cada 60-90 minuts. La GnRH circula cap a la glàndula pituïtària on estimula la secreció de les hormones adenohipofisàries (FSH i LH), que al seu torn estimularan la producció d'hormones ovàriques (estrògens i progesterona) (**Figura 1**) (Stafford, 2005).

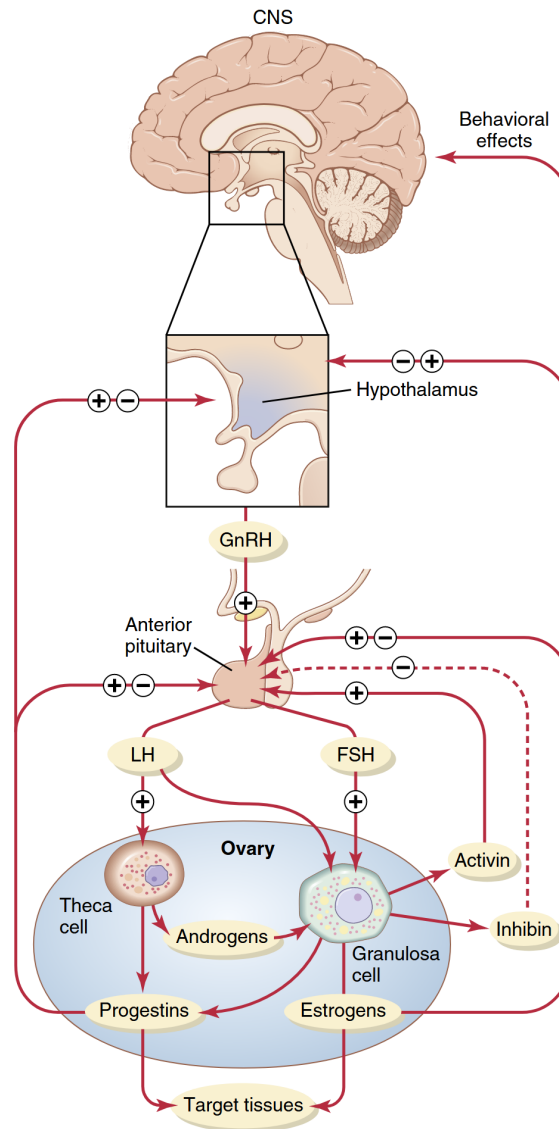


Figura 1. Regulació per retroalimentació de l'eix hipotalàmic-pituitari-ovàric. Adaptada de (Hall & Hall, 2021).

1.2. Fisiologia del cicle menstrual

Abans d'endinsar-nos en les definicions fisiològiques actuals del CM farem un pas enrere per recordar els seus inicis. L'origen etimològic de la paraula *eumenorrea* prové del grec. Els seus components lèxics són *eu-* ("bé"), *men* ("mes") i *rhein* ("fluir"), per tant, el terme cicle menstrual prové del concepte *bon flux mensual*. En l'àmbit col·loquial, *eumenorrea* és defineix com una menstruació

normal o regular, mentre que *menorrea* s'utilitza en un context mèdic per referir-se a la menstruació normal (D'Souza et al., 2023).

Les primeres definicions de l'època moderna del CM es troben entre els anys 1910 i 1950, les guies mèdiques del moment el definien com aquell cicle hormonal que es repetia cada 28 dies (Corner, 1951). Ja en el 1960 es va relacionar el pic de la LH amb l'ovulació (Midgley & Jaffe, 1966; Ross et al., 1967) i a partir d'aquí es van definir les fases fol·licular i lútea separades per l'ovulació; una conseqüència important del cicle sexual, que es situava a la meitat del cicle, és a dir, el dia 14. (Harlow et al., 2000; Harlow & Ephross, 1995). Aquesta visió històrica on els cicles fora del rang de 28 dies es consideraven irregulars i indicadors d'algun problema endocrí ha quedat obsolet degut a l'àmplia variabilitat interindividual i intraindividual al llarg del CM (Bull et al., 2019; Elliott-Sale et al., 2021). S'han descrit CM normals compresos entre 21 i 35 dies (Elliott-Sale et al., 2021) tot i que altres autors també consideren un marge entre 24 i 38 dies (Bouchard et al., 2023; Munro et al., 2018).

Al llarg del CM les hormones esteroides, E2, P4, FSH i LH fluctuen de manera regular per un efecte de retroalimentació negativa i positiva. En funció d'aquestes concentracions el cicle es pot dividir en dos fases principals: fol·licular i lútea, i alhora cadascuna d'elles es pot subdividir en 3 fases més (D'Souza et al., 2023). Respecte els canvis físics que les hormones provoquen als òrgans sexuals, ovaris i úter, es poden descriure dos escenaris compresos dins del que s'anomena cicle ovàric i cicle uterí (Hall & Hall, 2021) (**Figura 2**).

1.2.1. Fase fol·licular

La llargada de la fase fol·licular s'assumeix des del primer dia de sagnat fins el pic de la LH i té una durada mitja de 14.7 ± 2.4 dies (Cole et al., 2009). Es pot subdividir en les tres fases següents:

- **Fase menstrual:** el primer dia de sagnat implica la fi del cicle anterior i l'inici de la fase fol·licular i té una durada d'entre 4 i 6 dies. Al no haver-se produït un embaràs, el nivell de les hormones

ovàriques baixa en picat i es produeix una degradació i involució de la mucosa uterina que acompanya el fluid menstrual (Hall & Hall, 2021).

- **Fase fol·licular mitja i tardana:** un cop finalitzada la menstruació i degut a l'alliberament pulsatiu de la GnRH, s'estimula un augment suau i progressiu sobretot de FSH, però també de LH, des de la hipòfisis anterior. En els ovaris, la FSH indueix el creixement dels fol·licles, proliferant les cèl·lules de la granulosa i de la teca (Hall & Hall, 2021). El líquid fol·licular conté una elevada concentració d'E2 que a mesura que avancen els dies facilita la maduració dels ovòcits i del fol·licle que madurarà totalment. Paral·lelament, els estrògens engruixiran l'endometri i estimularan la creació de flux vaginal afavorint la fecundació (Duane et al., 2022; Silberstein & Merriam, 2000).
- **Ovulació:** L'increment progressiu dels estrògens estimula la sensibilitat hipofisiària per la GnRH que provoca un pic de LH. Aquest increment sobtat és necessari perquè el creixement fol·licular finalitzi i es produeixi l'ovulació. Aproximadament 24 hores abans de l'ovulació la secreció d'E2 disminueix i comença l'alliberació de P4, facilitant que el fol·licle es trenqui i s'alliberi l'òvul (Laborde et al., 1976) per posteriorment dirigir-se a les trompes uterines on pot ser fecundat per un espermatozoide.

1.2.2. Fase lútia

La llargada de la fase lútia es calcula com la llargada del CM menys el dia del pic de LH i té una durada mitja de 13.2 ± 2.0 dies (Cole et al., 2009). Es pot subdividir en les tres fases següents:

- **Fase lútia primerenca:** després de l'ovulació, les cèl·lules de la teca i de la granulosa del fol·licle es transformen en cèl·lules luteíniques que a través del procés de luteïnització, depenent de la secreció de

LH, es converteixen en el cos luti. El cos luti és un òrgan amb una gran capacitat secretora que produeix, en aquests primers dies, un augment de P4, també inhibina que inhibeix FSH, al mateix temps es produeix una reducció de E2 (Hall & Hall, 2021). Aquest ambient hormonal afavoreix la vascularització de l'endometri, per facilitar la implantació de l'embrió (Richards, 2018) i provoca un augment de la temperatura corporal (Duane et al., 2022).

- **Fase lútia mitja:** el cos luti continua secretant P4 i E2, aquestes hormones es troben en el seu pic màxim entre els dies 21 i 24 (en un cicle de 28 dies) (D'Souza et al., 2023). Les hormones ovàriques, especialment E2, exerceixen un efecte de retroalimentació que manté la FSH i la LH en uns nivells baixos (Hall & Hall, 2021).
- **Fase lútia tardana:** en el cas que no s'hagi produït la fecundació el cos luti començarà a degenerar i en conseqüència els nivells de E2 i P4 es reduiran. La involució final del cos luti i la interrupció brusca de les hormones ovàriques eliminarà la inhibició de la adenohipòfisis permetent la secreció de la FSH i LH, alhora aquestes permetran el creixement de nous fol·licles i per tant començarà un nou cicle ovàric i uterí amb el despreniment de l'endometri en forma de sang menstrual (Hall & Hall, 2021).

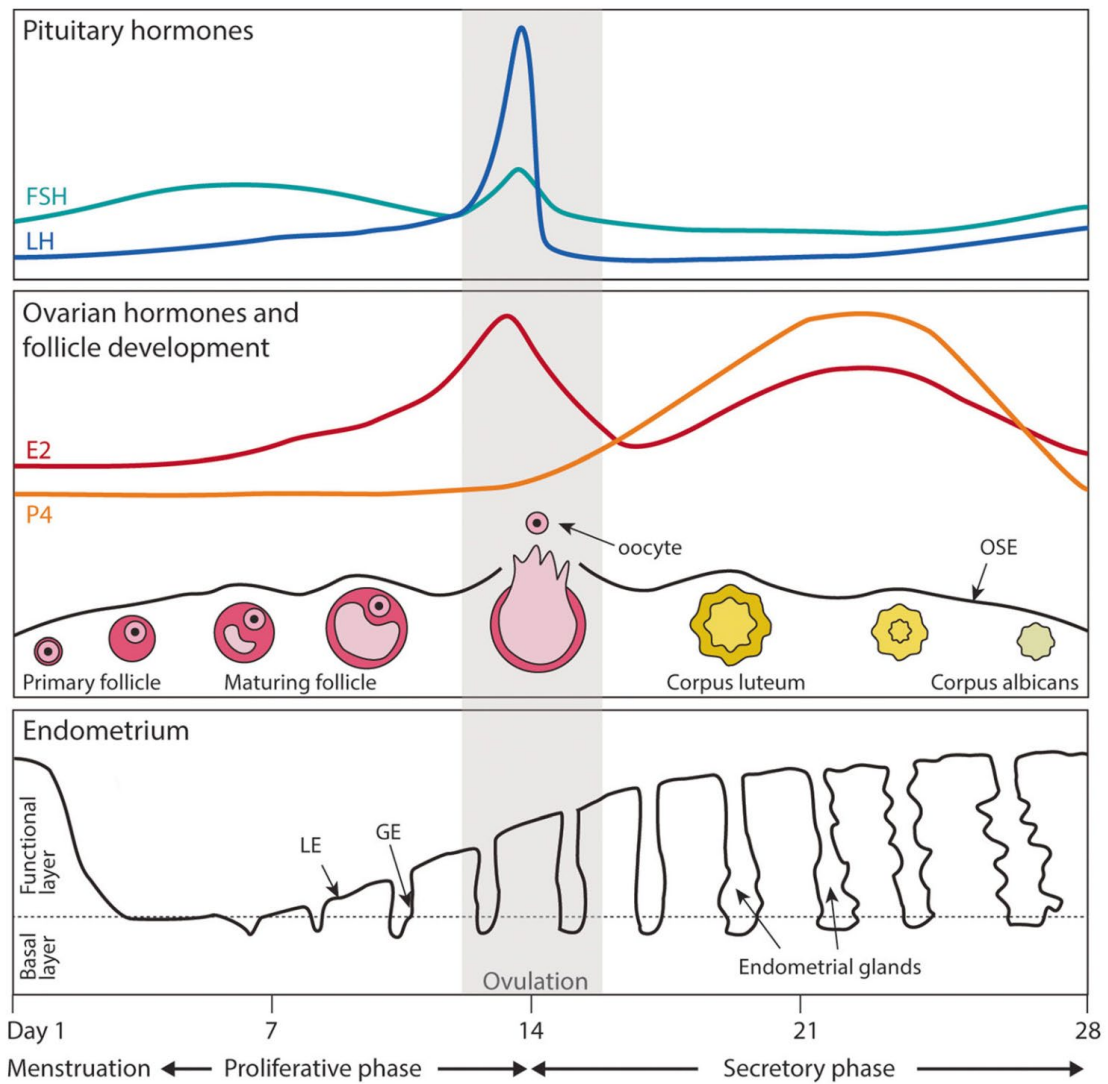


Figura 2. Fases i hormones del cicle menstrual. Adaptada de (Chumduri & Turco, 2021).

2. El cicle menstrual en l'àmbit de la recerca

2.1. El cicle menstrual com a cinquè signe vital

L'Associació Americana d'Obstetrícia i Ginecologia (ACOG) va emetre el 2015 un comunicat oficial on reconeixia el CM com a cinquè signe vital, de la mateixa manera que ho són la freqüència cardíaca, la freqüència respiratòria, la pressió sanguínia, i la temperatura corporal (ACOG, 2015).

Els signes vitals ens permeten interpretar processos corporals, ajudar a identificar alteracions de la salut, diagnosticar patologies, indicar la necessitat d'un tractament i promoure la salut (Brekke et al., 2019; Kellett, 2017). El CM és un signe vital des de l'adolescència fins la menopausa i és una eina molt poderosa, tant pel personal mèdic com per les pròpies persones menstruants, com a indicador de l'estat de salut en general i en totes les etapes de la vida d'una dona (Hennegan et al., 2021; Rosen Vollmar et al., 2025).

Les irregularitats en la llargada del CM, la variabilitat en el volum i la duració del sagnat o les absències de la menstruació ens poden estar indicant disrupcions endocrines i de l'eix HPO (Saei Ghare Naz et al., 2020; Shufelt et al., 2017) (**Taula 1**).

El control i la regularitat del CM no tan sols ens permet diagnosticar patologies o serveix com indicador de la salut en el moment present, també ens aporta informació de la salut a llarg termini (Rosen Vollmar et al., 2025). Existeixen múltiples publicacions que relacionen una prolongada exposició d'alts nivells d'E2 i baixos de P4, cicles irregulars o amenorrea amb el càncer, la diabetis, la patologia cardiovascular, les fractures òssies i la mortalitat prematura (Nicodemus et al., 2001; Wang et al., 2022; Wang et al., 2020).

Taula 1. Problemàtiques de salut i les relacions amb el cicle menstrual.

Problemes de salut	Canvis en el cicle menstrual
Desordres endocrins	
Síndrome d'ovari poliquístic	Irregulars, sagnats infreqüents, anovulació, , sagnat intermenstrual
Amenorrea hipotalàmica	Amenorrea
Diabetis (I i II)	Cicles llargs, sagnat infreqüent, variabilitat en la llargada dels CM, prolongat sagnat abundant
Hipotiroidisme	Sagnat irregular i infreqüent, sagnat fort o prolongat
Hipertiroidisme	Sagnat infreqüent o freqüent, poc sagnat
Irregularitats en el sagnat	
Disfuncions en la coagulació Patologia de von Willebrand	Sagnat fort o prolongat
Anomalies estructurals	
Endometriosis	Sagnat menstrual fort o prolongat
Pòlips endometrials i del cervix	Sagnat intermenstrual
Anomalies estructurals congènites	Amenorrea, increment de la dismenorrea després de la menarquia, dolor abdominal i pelvià
Infeccions	
Vaginitis o cistitis	Sagnat intermenstrual
Malalties de transmissió sexual	Sagnat intermenstrual
Canvis fisiològics al llarg de la vida	
Menarquia	Cicles ≥ 21 dies i ≤ 45 dies, anovulacions, fort sagnat menstrual
Embaràs	Amenorrea
Postpart	Amenorrea, anovulacions, fase fol·licular llarga i lúcia curta, flux cervical poc relacionats amb les fases del CM i l'ovulació
Amenorrea durant la lactància	Amenorrea, anovulacions, sagnat infreqüent
Perimenopausa	Variabilitat en la llargada del cicles i el sagnat menstrual, anovulacions
Problemes de salut	Canvis al llarg del cicle menstrual
Neurològics	
Migranyes	Síntomes comuns en fase premenstrual, menstrual i ovulació
Autoimmunes	
Lupus eritematós sistèmic	Síntomes empitjoren en fase premenstrual
Esclerosi múltiple	Síntomes empitjoren en fase lúcia i premenstrual
Artritis reumàtica	Síntomes milloren en fase lúcia i empitjoren en fase menstrual
Dolor crònic	
Fibromiàlgia	Dolor i símptomes empitjoren en fase premenstrual i menstrual
Múscul esquelètic	Dolor empitjora en fase premenstrual i menstrual
Salut mental	
Depressió, desordres de pànic, desordres bipolars, desordres psicòtics o d'alimentació	Síntomes empitjoren en fase premenstrual i menstrual

CM: cicle menstrual. Adaptada de Rosen Vollmar et al., 2025.

Tot i l'important volum d'estudis científics que evidencien la importància de monitoritzar el CM dins les revisions mèdiques, encara no existeix una tendència general de registre en la pràctica diària clínica i monitorització d'aquest (Rosen Vollmar et al., 2025).

Tenint en compte la informació valuosa que ens aporta el CM, els professionals de la salut, de l'esport i de la recerca, han de preguntar sobre el CM a les persones menstruants i a la població d'estudi (Rosen Vollmar et al., 2025; Tenforde et al., 2025). Cal educar-les en la biologia fonamental del cicle sexual capacitant-les per controlar, observar i identificar tant patrons repetitius com simptomatologia al llarg dels seus cicles, per així ésser capaces d'entendre el seu propi perfil hormonal. És de rellevant importància identificar cicles irregulars o problemes aguts i fer un seguiment longitudinal al llarg del temps de forma anàloga a les altres constants vitals, per tal de tenir una actitud proactiva i preventiva (Rosen Vollmar et al., 2025).

2.2. El cicle menstrual en les ciències de l'esport

Històricament en l'àmbit de la recerca biomèdica el CM s'ha estudiat principalment des d'una perspectiva de la salut reproductiva i la fertilitat (Duane et al., 2022; Treloar et al., 1967) i també com a indicador de la salut en general tal com s'ha comentat anteriorment. Tot i així, en les últimes dècades múltiples estudis també s'han focalitzat en els efectes de les hormones ovàriques en teixits com el muscular, l'epitelial, el conjuntiu, el nerviós i l'ossi (Sipilä et al., 2015; Wierman, 2007) i la seva implicació en diferents processos (metabòlics, immunitaris, ventilatoris, cognitius) (Citherlet et al., 2025; Soria-Contreras et al., 2025; Teede et al., 2023; Williams et al., 2023) i funcions biològiques (cardiorespiratoria, vascular, genitourinària, gastrointestinal, regulació autonòmica) (Citherlet et al., 2025; Delcourt et al., 2025; D'Souza et al., 2023; Hannan et al., 2024; Ojedo-Martín et al., 2024).

Aquest potencial paper influent de les hormones femenines en múltiples sistemes biològics, ha estat el punt de partida perquè molts grups de recerca

s'hagin qüestionat si controlar el CM i les seves fluctuacions hormonals (O'Bryan et al., 2022) té sentit quan volem entendre la resposta a l'exercici físic al llarg de les fases del CM (D'Souza et al., 2023). Existeixen múltiples tòpics com ara l'oxidació de substrats, el rendiment, la capacitat aeròbica, la hipertròfia muscular o la resposta a l'exercici en altitud que han intentat respondre aquesta pregunta amb una gran disparitat entre els resultats (Hohenauer et al., 2024; McNulty et al., 2020).

Existeix un biaix androcèntric en la recerca de les ciències de l'esport i la biomedicina que ha comportat que tradicionalment, la major part dels estudis s'hagin realitzat en homes, assumint que els resultats són extrapolables a les dones. No tenir en compte les diferències fisiològiques i hormonals suposa una manca d'evidència específica per a la dona esportista (Costello et al., 2014). Durant dècades s'han exclòs a les dones com a participants en els estudis, en part, per la complexitat metodològica que implica l'estudi de la fisiologia hormonal femenina i possiblement perquè estudiar els homes implica menys complexitat i "menys feina" (D'Souza et al., 2023; Mujika & Taipale, 2019). Els resultats obtinguts en el rendiment esportiu i l'entrenament han estat obtinguts en experiments realitzats en homes (D'Souza et al., 2023; Elliott-Sale et al., 2021). Afortunadament les regles del joc estan canviant i des de principis del segle XXI s'ha incrementat l'interès per incloure les dones en estudis i entendre com pot afectar la fisiologia femenina en les respostes a l'exercici (Elliott-Sale et al., 2023). Tot i així, la manca d'estudis d'alta qualitat realitzats en dones, les diferències metodològiques i la disparitat de resultats implica una escassetat de coneixement i d'oportunitats per les atletes femenines per tal d'aconseguir el seu màxim rendiment esportiu, que no es resoldrà fins que els efectes de les hormones femenines en la capacitat física no sigui del tot clar (Elliott-Sale et al., 2021). Com a resultat d'aquest biaix no existeixen manuals d'exercici i esport, en relació al rendiment, la nutrició o la prevenció de lesions dissenyats específicament per esportistes o practicants d'activitat física femenines. Fins al moment, nombrosos meta-anàlisis i estudis han arribat a la conclusió que calen estudis de més qualitat abans d'afirmar que el CM i els anticonceptius hormonals afecten o no el rendiment esportiu, i en el cas que aquests provoquin algun efecte, sembla que aquest és trivial (Elliott-Sale et al.,

2020; McNulty et al., 2020). Cal dir que en tots els tòpics que inclouen la fisiologia de l'exercici (metabolisme, capacitat aeròbica, rendiment muscular, etc.) existeixen estudis amb resultats contradictoris (Barba-Moreno et al., 2022; Hackney, 2021; Romero-Parra et al., 2020; Vaiksaar et al., 2011a).

A priori, pot semblar que estudiar el sexe femení sigui més complicat que estudiar el masculí, però precisament aquest és el primer error, comparar-ho. La investigació científica té com a objectiu produir coneixement, crear hipòtesis a partir d'un problema i trobar les respostes a certs interrogants (Quisbert Vargas & Ramírez Flores, 2011). Simplement cal que en els dissenys experimentals en dones que sovint han estat poc considerats, descrits, executats i controlats integrin la naturalesa cíclica hormonal intrínseca que les caracteritza (Elliott-Sale et al., 2021).

Certament, la investigació en el sexe femení requereix unes estratègies específiques com la realització de mesures repetides (en diferents fases del CM), el seguiment del cicle amb aplicacions mòbils, fer els tests d'ovulació, anàlisis sanguínies, etc. A més a més, implica uns constants canvis de planificació del dia de la recollida de dades (Mujika & Taipale, 2019) degut als imprevistos inherents en l'estudi del CM (absència d'ovulació, cicles més llargs o més curts del normal, etc.) i sovint impliquen visites en cicles posteriors, per tal de respectar i no alterar el perfil hormonal prèviament establert en el disseny d'estudi. Cal tenir en compte que aquestes dificultats afecten el reclutament i la pèrdua de participants (Elliott-Sale et al., 2021). Un altre aspecte important alhora de dissenyar els estudis és ser conscients que el doble-cegament en l'anàlisi del CM no és possible, però si el cegament del personal investigador posterior a la recollida de mostres (D'Souza et al., 2023). Aquestes característiques són específiques en els estudis de les hormones femenines i s'atribueix a la presència de fluctuacions agudes de les hormones (ritmes ultradians, circadians i infradians). Per exemple, en una dona eumenorreica el nivell d'hormones femenines pot canviar el 100% en tant sols 24 hores (Davis & Hackney, 2017). Així com també es poden donar grans fluctuacions a llarg terme o cròniques com durant l'embaràs, menopausa, l'ús de anticonceptius hormonaals o el tractament de reemplaçament hormonal. Aquestes variacions

contrasten amb els homes que presenten perfils hormonals sexuals relativament estables des de la pubertat, exceptuant la variació dels ritmes circadians (Elliott-Sale et al., 2021).

2.3. Definint un cicle menstrual normal

La federació internacional de ginecologia i obstetrícia defineix com un CM normal aquell que té una llargada entre 24 i 38 dies (Bouchard et al., 2023), la longitud de la menstruació ha de ser ≤ 8 dies amb un flux normal, sense pèrdues sanguínies entre les fases i no hi pot haver més de 7-9 dies de diferència entre CM consecutius.

Altres definicions consideren no tant sols altres rangs del CM (21-35 dies) (D'Souza et al., 2023) si no altres aspectes com el volum de sagnat, l'absència de simptomatologia i la presència d'ovulació. Es considera normal un volum menstrual d'entre 5 i 80 ml per cicle (Hallberg et al., 1966) i que no contingui coàguls menstruals (Rae et al., 2013), tot i que es pot observar teixit endometrial entre el sagnat. Encara que és molt habitual (Momma et al., 2021), no és normal la presència de dolor menstrual, anomenat com dismenorrea (Sultan et al., 2012). Un altre indicador de normalitat és que es produeixi l'ovulació, que es pot considerar, biològicament, el procés més important de tot el cicle i que permetrà dur a terme la fecundació. Les persones menstruants poden reconèixer la fase d'ovulació gràcies als indicadors físics que es situen al voltant d'aquests dies com ara la presència de flux vaginal, l'augment de la libido i l'increment de temperatura corporal després de l'ovulació per un efecte de la P4 (Roney & Simmons, 2013).

En l'àmbit de la recerca s'ha definit eumenorrea en aquelles participants del sexe femení que compleixen els següents criteris (Elliott-Sale et al., 2021):

- Cicles menstrual amb llargades ≥ 21 dies i ≤ 35 dies (9 o més cicles per any)
- Evidència d'augment de la LH
- Correcte perfil hormonal

- No ús d'hormones anticonceptives els 3 mesos anteriors al reclutament de l'estudi

Un altre aspecte en el qual encara hi ha controvèrsia en la bibliografia és la nomenclatura associada a les fases del CM. Tot i que és molt clar que el cicle sexual es divideix en dues fases (fol·licular i lúcia) i aquestes es separen per l'ovulació, els estudis en dones eumenorreiques les subdivideixen en 6 o 7 fases sovint sense aclarir el perfil hormonal de cadascuna. En l'àmbit dels estudis en les ciències de l'esport s'han proposat 4 fases hormonals, que representen els canvis i estats més rellevants de les hormones E2 i P4, per tal d'unificar la relació en treballs sobre els efectes de les hormones ovàriques en fisiologia, salut i rendiment (Elliott-Sale et al., 2021) (**Taula.2**).

Taula 2. Proposta de fases del cicle menstrual en funció de les concentracions hormonals.

Fase	Identificació de la fase	Objectiu
Fase 1	Des del primer de dia de menstruació fins al dia 5 del cicle. Els nivells d'E2 i P4 són baixos	Estudiar les concentracions més baixes d'E2 i P4
Fase 2	Es troba entre les 14-26 hores abans de l'ovulació i el pic de LH. Els nivells d'E2 són més elevats que en fases 1, 3 i 4. La P4 es troba més elevada que en la fase 4 però per sota de 6,36 nmol.L ⁻¹	Estudiar les concentracions més altes d'E2 mentre la P4 es manté baixa
Fase 3	S'identifica per un test d'ovulació en orina positiu. Els E2 estan més alts que en fase 1 però més baixos que en fase 2 i 4. La P4 està més alta que en fase 1 però més baixa de 6,36 nmol.L ⁻¹	Estudiar un nivell mig d'E2 mentre la P4 es manté baixa
Fase 4	S'identifica 7 dies després de la confirmació de l'ovulació. E2 estan més alts que en fase 1 i 3, però més baixos que en la 4. La P4 està per sobre de 16 nmol.L ⁻¹	Estudiar els nivells alts de P4 i E2 alhora

E2: 17β-estradiol, P4: progesterona. Adaptada de (Elliott-Sale et al., 2021).

A continuació es mostren els valors de referència de les hormones FSH, LH, E2 i P4 en diferents fases del cicle menstrual (**Taula 3**):

Taula 3. Nivells hormonals en sèrum sanguini.

Hormones adenohipofisàries						
Fases del CM	LH, IU/L			FSH, IU/L		
	percentil			percentil		
	Mediana	5th	95th	Mediana	5th	95th
Follicular primerenca	3,96	2,01	7,80	6,42	3,91	8,76
Follicular tardana	5,68	3,24	14,68	4,66	2,97	6,99
Ovulació	41,19	21,16	73,63	12,82	5,30	15,07
Lútia primerenca	7,86	3,65	18,03	5,62	3,02	11,09
Lútia mitja	3,88	1,05	9,73	3,14	1,48	5,31
Lútia tardana	2,75	0,51	6,98	2,85	1,14	5,64
Hormones ovàriques						
Fases del CM	Estradiol, pmol/L			Progesterona, nmol/L		
	percentil			percentil		
	Mediana	5th	95th	Mediana	5th	95th
Follicular primerenca	149,74	77,99	266,08	0,64	0,32	1,91
Follicular tardana	450,49	195,43	1146,91	0,64	0,32	1,59
Ovulació	671,06	482,00	1425,39	2,54	1,24	4,13
Lútia primerenca	313,42	178,14	566,43	13,67	3,15	39,65
Lútia mitja	495,82	275,95	761,67	36,25	21,21	54,28
Lútia tardana	327,36	100,52	787,14	13,99	1,96	49,18

CM: cicle menstrual, LH: hormona luteïnitzant, FSH: hormona follicle estimulant. Adaptada de (Stricker et al., 2006).

Tot i l'acurada definició del CM normal en la bibliografia, no es pot obviar la important variabilitat entre subjectes i en el mateix subjecte (variabilitat entre CM en el mateix individu) en quant a la duració del CM, el moment de l'ovulació i les concentracions hormonals relatives (Bull et al., 2019; Oosthuyse et al., 2023). S'han observat grans canvis entre perfils hormonals en cada fase (D'Souza et al.,

2023) (**Figura 3**). Per tant, existeix una gran complexitat alhora de definir les fases del CM, en funció d'un determinat entorn hormonal o, dit d'una altra manera, als canvis de concentració d'una hormona concreta. En conseqüència atribuir una sèrie d'efectes fisiològics específics a cada fase és difícil (Oosthuyse et al., 2023; Sims & Heather, 2018).

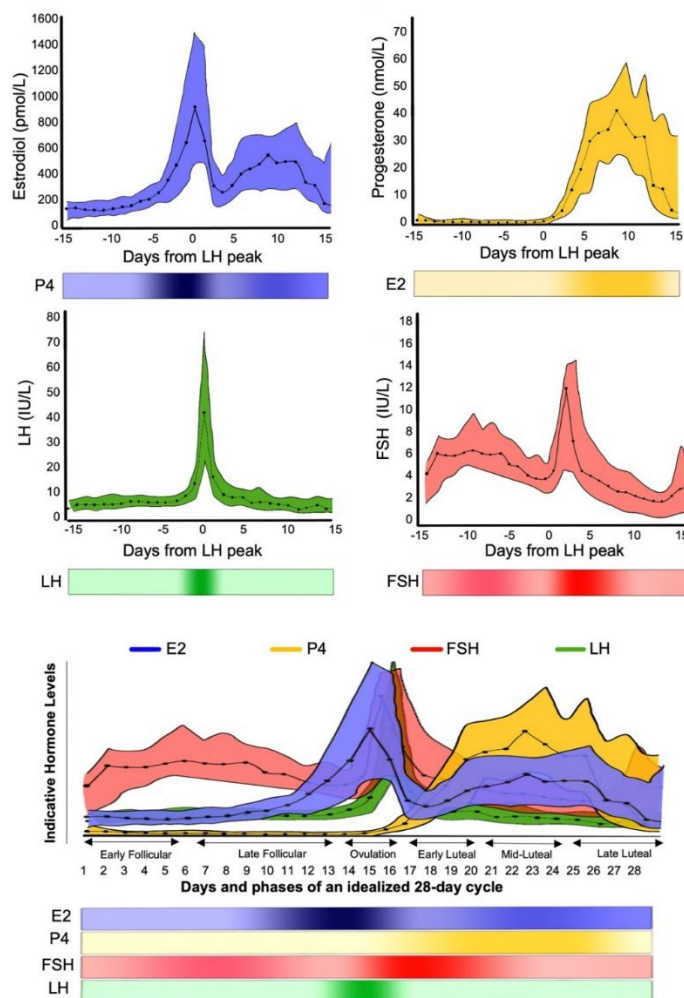


Figura 3. Fluctuacions de les hormones femenines al llarg del cicle menstrual. Adaptada de (D'Souza et al., 2023).

La **Figura 4** mostra la gran variabilitat en la durada dels cicles menstruals entre subjectes eumenorreiques (fins 14 dies de diferència) i la **Figura 5** mostra les

diferències de concentracions plasmàtiques d'E2 i P4 entre individus amb cicles de durades similars (D'Souza et al., 2023).

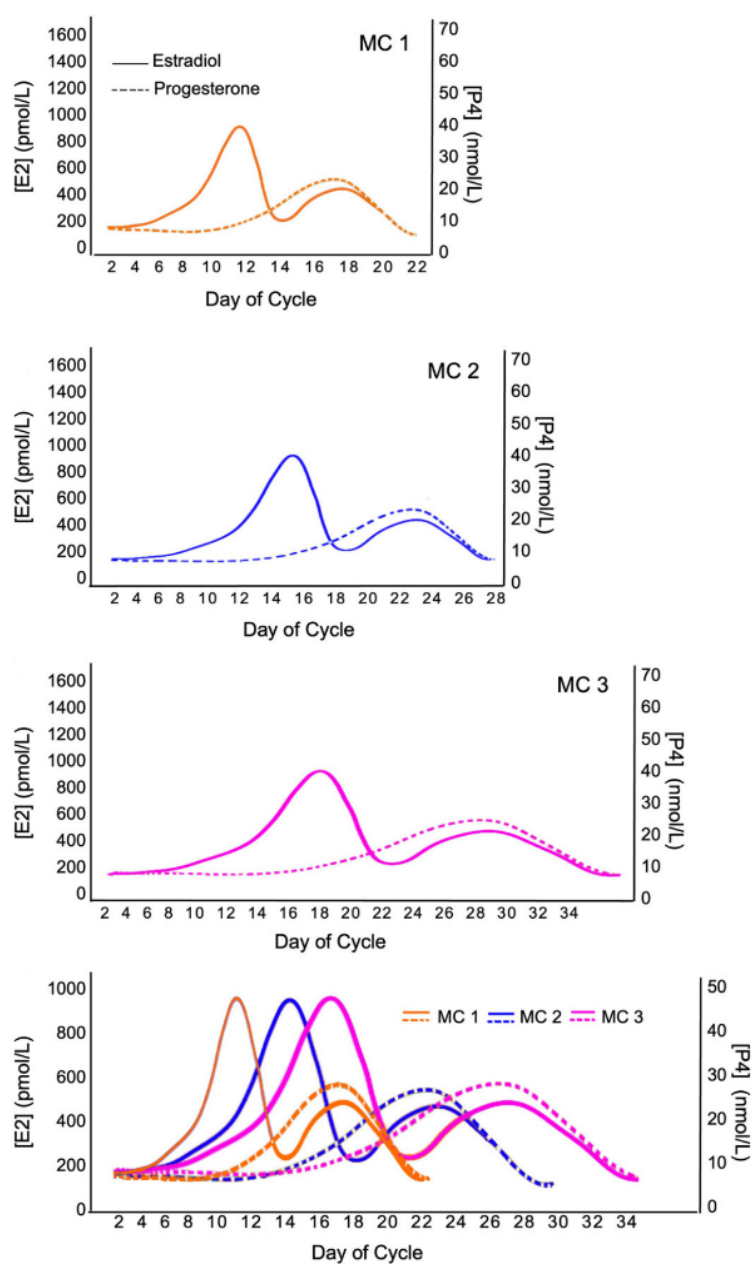


Figura 4. Variabilitat de longitud de cicles menstruals. Adaptada de (D'Souza et al., 2023).

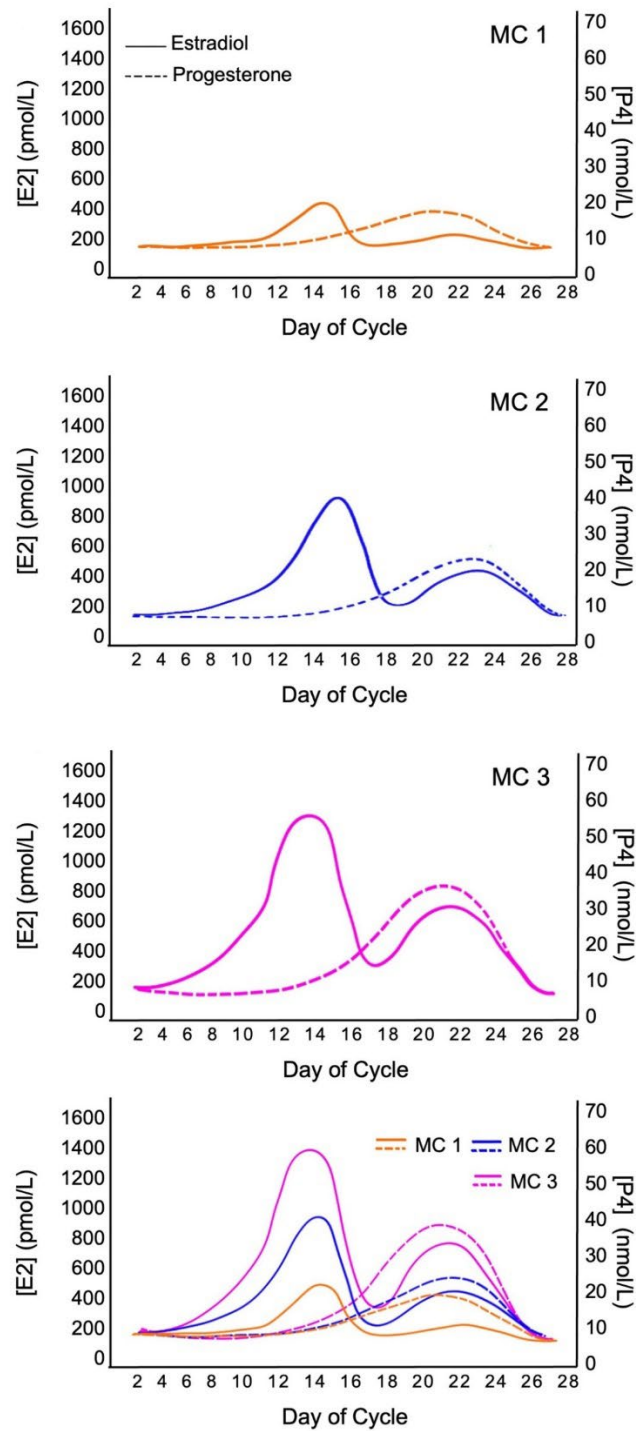


Figura 5. Variabilitat de concentracions hormonals en cicles de 28 dies. Adaptada de (D'Souza et al., 2023).

2.3.1. Metodologia per la recerca del cicle menstrual

L'increment en la popularitat i l'interès en l'àmbit de l'esport femení en els mitjans de comunicació ha generat unes demandes a la comunitat científica amb l'objectiu o intenció de prioritzar la recerca específicament en el sexe femení. En els últims anys el nombre d'articles amb participants femenines està patint un desenvolupament realment favorable, tot i així, la tendència a suposar o estimar les fases del CM també s'ha vist incrementat (Elliott-Sale et al., 2025)

S'ha observat un augment en la literatura en l'ús de mesures indirectes per determinar els perfils hormonals que poden passar per alt certs moments clau en les fluctuacions hormonals ovàriques com l'increment de la LH previ a l'ovulació o el pic de progesterona en la fase L mitja. Sobretot en l'àmbit d'estudi de les atletes professionals femenines degut a les múltiples dificultats per recollir dades com la disponibilitat d'horaris, ampli calendari de competicions, viatges, lesions, canvis d'*staff* tècnic, etc. podria convidar a suposar les fases del CM en comptes d'utilitzar la metodologia correcta.

A continuació s'expliquen les metodologies utilitzades en l'àmbit de l'exercici per estudiar el CM (Janse De Jonge et al., 2019):

- **Ecografia transvaginal:** aquest és el mètode més directe per determinar l'ovulació. Tot i així, té moltes limitacions, és una tècnica invasiva que l'ha de realitzar personal tècnic especialitzat i requereix de moltes mesures al dia.
- **Recompte basat en el calendari:** és el mètode més indirecte, que es basa en la informació auto-reportada de la participant. Té múltiples limitacions, tan sols ens informa del primer de la menstruació i les fases F i L no poden ser assumides. A més, no distingeix entre cicles anovulatoris o fases lúties deficientes.
- **Temperatura corporal basal:** mètode àmpliament utilitzat per determinar l'ovulació. Tot i que pot ser útil per identificar el dia proper a l'ovulació i la durada relativa de les fases fol·licular i lúcia, no proporciona informació sobre els nivells hormonals reals.

- **Test d'ovulació en saliva:** mètode indirecte per determinar l'ovulació observant la cristallització de la saliva. S'ha correlaciona bé amb el mètode de la temperatura corporal, però la sensibilitat es redueix a la meitat comparant amb l'ecografia transvaginal.
- **Mesura en orina de la LH:** és el mètode directe menys invasiu i costós que permet identificar l'augment de la LH unes hores abans de l'ovulació, normalment entre les 14 i 26 hores següents. Les limitacions són dificultats en la interpretació del resultat per part de la participant i que no pot identificar fases lúties deficientes.
- **Anàlisis d'hormones salivals:** mètode no invasiu que detecta les hormones ovàriques en saliva. Les limitacions recauen en el patró pulsatiu de l'E2 (60-90 minuts) i la P4 (24 hores) i la necessitat de realitzar múltiples proves. A més, les baixes concentracions d'aquestes hormones ($\approx 2\%$).
- **Anàlisis d'hormones en sèrum:** es considera el mètode *Gold Standard* per determinar les hormones femenines. Tot i que no existeix un consens del nivell de la P4 en la fase L, el límit conservador de $16 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ hauria de disminuir el risc d'incloure cicles anovulatoris o fases lúties deficientes.

Un recent article d'opinió ha subratllat la importància d'utilitzar mètodes bioquímics per determinar les fases del CM, entre ells l'ús del test d'ovulació en orina (Elliott-Sale et al., 2025) o l'anàlisi en sèrum per detectar fases lúties curtes o deficientes. Quan s'utilitza tan sols la monitorització de la menstruació s'hauria de dividir el cicle entre menstruació i dies de no menstruació i per tant no assumir altres fases del CM i la inherent fluctuació hormonal. A més a més, la presència de sagnat menstrual regular no ens confirma un CM consistent amb fluctuacions hormonals regulars (Janse De Jonge et al., 2019).

Tot i que la metodologia *Gold Standard* en recerca per determinar les fases del CM és fer un anàlisi en sèrum per observar els nivells hormonals (Janse De Jonge et al., 2019) i posteriorment s'infereixen els efectes fisiològics a una hormona concreta, a dia d'avui no hi ha prou evidència de com els nivells hormonals sistèmics estan relacionats amb les concentracions tissulars (D'Souza et al., 2023).

És possible que les concentracions a nivell tissular i la senyalització post-receptors hormonals siguin més rellevants en els processos fisiològics metabòlics que el nivell sanguini (Grimm et al., 2016; M. Hansen, 2018; Yoh et al., 2023).

Tenint en compte les dificultats per trobar subjectes amb el mateix rang hormonal i per tal d'unificar la terminologia i els criteris de selecció de les participants en els estudis de les ciències de l'exercici i l'esport s'ha definit el subjecte "naturalment menstruant " que compleix els següents requisits (Elliott-Sale et al., 2021):

- Cicles menstruals amb llargades ≥ 21 dies i ≤ 35 dies.
- No s'ha confirmat l'ovulació (ni amb test d'orina, ni amb mostra sanguínia).
- Només es té un registre del cicles anteriors en funció d'una única fase (fase menstrual).

2.4. Factors que influencien els nivells d'estrògens i progesterona

Durant els anys reproductius hi ha 5 principals factors que influencien els nivells d'E2 i P4 (Elliott-Sale et al., 2021):

- Fluctuacions hormonals fisiològiques al llarg d'un CM eumenorreic.
- Alteracions del CM eumenorreic per patologies o altres alteracions clíniques i desequilibris hormonals (síndrome d'ovaris poliquístics, endometriosis i altres disrupcions de l'eix hipotalàmic-hipofisiari), baixa disponibilitat energètica, els primers dos anys després de la menarquia, perimenopausa.
- Alteració del CM eumenorreic per l'ús d'hormones exògenes (anticonceptius hormonals, tractament de reproducció assistida, tractament hormonal substitutiu).
- Embaràs.
- Menopausa.

3. Principals irregularitats del cicle menstrual en les atletes femenines

Tots aquells cicles sexuals que no compleixen la definició de CM normal (**Capítol 2.3**), es consideren irregulars. És a dir, cicles més curts (< 24 dies) o més llargs (> 38 dies), sagnats de més de 8 dies tant si són lleugers o molt abundants ($> 80\text{ml}$) (Hallberg et al., 1966), pèrdues entre fases i més de 8-10 dies de diferència entre cicles consecutius (Munro et al., 2018). La presència de simptomatologia al llarg del CM i durant els dies de menstruació també es consideren irregularitats del CM (**Taula 4**). Cada alteració necessita d'una metodologia determinada, per exemple, el recompte auto-reportat del CM, tan sols pot detectar aquelles irregularitats en relació a la llargada del cicle (oligomenorrea o polimenorrea) o l'absència de períodes mensuals regulars (amenorrea), ambdós considerats irregularitats mensuals severes. (De Souza et al., 2010). D'altra banda, per tal de detectar trastorns subtils (fase lútea defectuosa i anovulació) no n'hi ha prou amb una observació clínica, calen mesures hormonals diàries (De Souza et al., 2010).

Taula 4. Irregularitats del cicle menstrual en atletes femenines.

Terme	Definició
Amenorrea primària	Absència de menarquia als 15 anys quan el desenvolupament de caràcters sexuals secundaris és evident o si als 14 anys no es presenten caràcters sexuals secundaris.
Amenorrea secundària	Absència de ≥ 3 períodes consecutius en dones no embarassades amb un historial previ de menstruacions, que pot estar causat per patologies ginecològiques o problemes en la disponibilitat energètica.
Anovulació	Sagnats menstruals sense ovulació (no es detecta l'augment de la LH en orina ni per concentracions hormonals en sèrum sanguini).
Fase lútia defectuosa	CM amb concentracions de progesterona $< 16 \text{ nmol.L}^{-1}$ en la fase lútia o una fase lútia < 10 dies (segons referència)
Oligomenorrea	CM > 35 o 38 dies (segons la referència).
Polimenorrea	CM < 21 o 24 dies (segons la referència).
Dismenorrea primària	Dolor menstrual que no està relacionat amb altres patologies.
Dismenorrea secundària	Dolor menstrual associat a una patologia clínicament identificable. Sovint relacionat amb altre simptomatologia com dispareúnia, menorràgia o pèrdues de sang intermenstrual.
Menorràgia	Sagnats menstruals abundants $> 80\text{ml}$ per cicle.

CM: cicle menstrual, LH: hormona luteïnitzant. (Bouchard et al., 2023; Elliott-Sale et al., 2021; Hallberg et al., 1966; Janse De Jonge et al., 2019; Nagy et al., 2025).

3.1. Irregularitats severes

L'oligomenorrea i l'amenorrea es consideren irregularitats severes que es poden detectar amb una monitorització del CM, veient-se alterada la llarga dels dies d'aquest (oligomenorrea) o fins i tot amb una absència continuada de períodes (amenorrea). Cal tenir present que aquestes alteracions no exclouen altres trastorns com l'anovulació (**Figura 6**) (Elliott-Sale et al., 2025). La població de dones que practiquen exercici físic tenen una incidència més alta d'oligomenorrea (7%) i d'amenorrea (37,2%) en comparació amb la població sedentària (0%). La prevalença de dones amb amenorrea es significativament més alta ($p < 0.023$) entre esportistes respecte sedentàries (De Souza et al., 2010). Tot i que en la bibliografia les definicions d'amenorrea difereixen, existeix una tendència general d'alta

incidència entre dones esportistes (Beals & Hill, 2006; Nichols et al., 2007). Cal mencionar que el síndrome d'ovaris poliquístics (SOP), desordre endocrí i metabòlic més comú entre la població femenina fèrtil, també pot provocar CM més llargs i l'absència d'aquests (Yu et al., 2023). Alguns autors tenen la hipòtesis que l'hiperandrogenisme és, en la majoria dels casos, el principal factor subjacent que provoca oligomenorrea en la població femenina que practica exercici físic (Rickenlund et al., 2003).

3.2. Irregularitats subtils

Les irregularitats subtils com les fases lúties defectuoses i les anovulacions tenen una alta prevalença entre la població activa, en CM presumptament normals (26-35 dies) (**Figura 6**). Concretament, els trastorns subtils tenen una incidència entre la població activa (52%) en comparació amb la població sedentària (5%) (De Souza et al., 2010). En l'estudi realitzat per De Souza et al., 2010, al llarg de 2 o 3 cicles mensuals es va observar una prevalença d'anovulacions del 20,8% (25/120) i un 29,2% de fases lúties defectuoses (35/120). Aquest últim grup inclou; fases lúties curtes (FL < 10 dies) i fases lúties inadequades (pic de progesterona < 5µg/ml). Aquestes dades són rellevants considerant que tan sols el 4% dels cicles de dones sedentàries eren irregulars. A més a més, aquests trastorns tenen una potencial influència precursora de trastorns més greus com l'amenorrea (Elliott-Sale et al., 2025). Degut a que les irregularitats subtils sovint són asimptomàtiques (Elliott-Sale et al., 2025) i no presenten diferències entre intervals del CM, és a dir, la llargada d'aquests es manté dins la normalitat (26-35 dies), moltes passen inadvertides. La presència o absència de cicles curts o llargs no identifica aquests trastorns (De Souza et al., 2010).

Tenint en compte les conseqüències clíniques associades als trastorns del CM, com el risc de fractures, de patologia cardiovascular i l'impacte en la fertilitat (Shufelt et al., 2017) o fins i tot el risc que aquests trastorns siguin un component de la deficiència energètica relativa en l'esport (REDs) (**Capítol 3.4**). (Mountjoy

et al., 2023) és de vital importància utilitzar les metodologies apropiades per determinar les irregularitats menstruals en l'àmbit clínic.

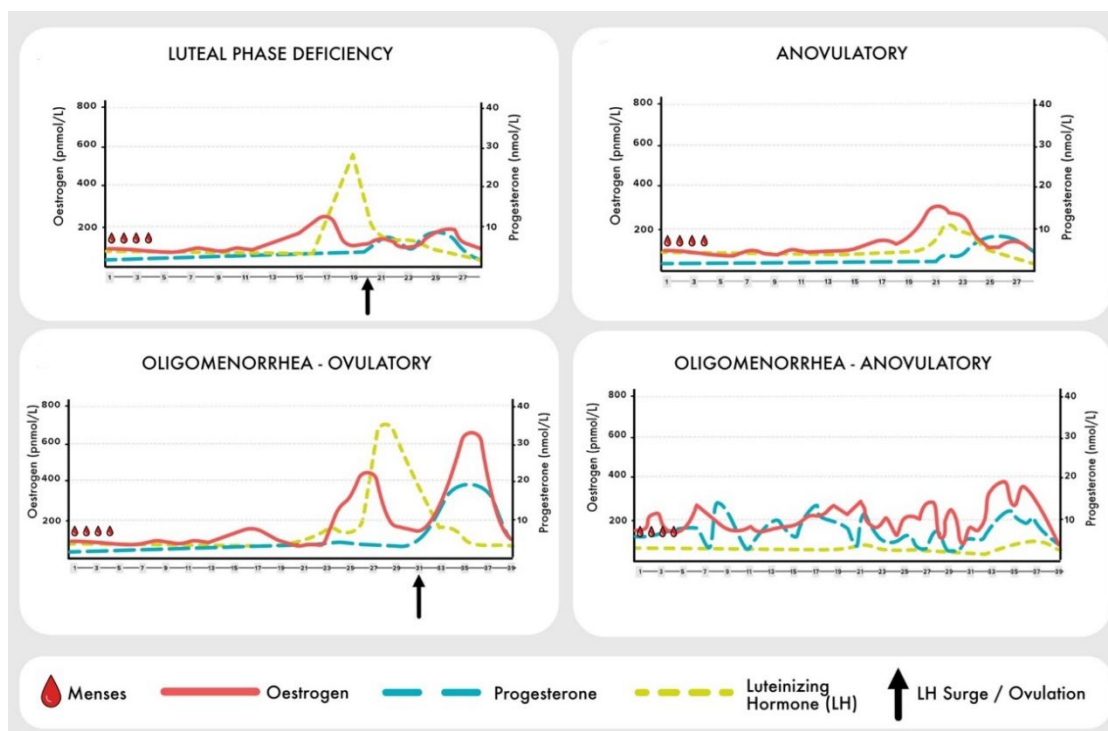


Figura 6. Irregularitats severes i subtils del cicle menstrual. Adaptada de (Elliott-Sale et al., 2025).

3.3. Irregularitats en funció del tipus d'esport

Com s'ha comentat anteriorment sembla que la població esportista té una major freqüència de desordres del CM en comparació amb la població general (De Souza et al., 2010): La prevalença d'aquests desordres es situa entre un 0% i 61% (Gimunová et al., 2022). La freqüència del desordres varia en funció del tipus d'esport (Nichols et al., 2007) i l'edat de l'atleta (Ravi et al., 2021).

Sembla que l'oligomenorrea és el desordre més comú per sobre de l'amenorrea entre diferents disciplines esportives (Gimunová et al., 2022). L'esport més exposat a aquest desordres és la gimnàstica rítmica (24,48% amenorrea primària, 30,61% amenorrea secundària i 43,59% oligomenorrea) seguit de la gimnàstica artística (8,33% amenorrea primària, 23,67% amenorrea secundària i 31,17% oligomenorrea). L'esport amb més prevalença per trastorn també és un

esport individual, la boxa (54,60 oligomenorrea). Pel que fa als esports cíclics els més afectats són els de resistència concretament les proves de mitja i llarga distància (11,40% amenorrea primària, 17,17% amenorrea secundària i 24,48% oligomenorrea), les curses de camp a través (*cross*) (10,02% amenorrea primària, 17,48% amenorrea secundària i 19,87% oligomenorrea) i la natació (19% amenorrea primària, 8,73% amenorrea secundària i 22,45% oligomenorrea). Pel que fa als esports d'equip destaca el voleibol amb una prevalença del 20,55% en amenorrea secundària (Gimunová et al., 2022).

3.4. De la triada de l'atleta femenina al REDs

Una de les problemàtiques actuals amb més rellevància en l'àmbit de l'esport femení, degut a les conseqüències multisistèmiques que té, són el que podríem agrupar com a síndromes relacionats amb una baixa disponibilitat energètica i que inclouen irregularitats hormonals. Tot i que no hem estudiat directament aquesta temàtica en aquesta tesi, degut al gran impacte que té en la salut de la dona esportista, vam decidir fer-ne una petita menció de l'evolució històrica i les causes principals.

El 1992 la *American College of Sports Medicine* (ACSM) va publicar el seu posicionament sobre la triada de l'atleta femenina que el definia com una connexió entre la disponibilitat energètica, la funció menstrual i la salut òssia. A la vegada aquestes interrelacions tenien unes manifestacions clíniques com la osteoporosis, l'amenorrea hipotalàmica funcional i els trastorns de l'alimentació. El punt central era la baixa ingesta energètica que afecta la salut reproductiva i òssia, degut a una restricció calòrica més habitual en les nenes o dones practicant d'esports estètics o de resistència (Berz & McCambridge, 2016). Aquesta idea va anar evolucionant amb els anys i la mateixa ACSM va fer una altra posició l'any 1997 (Otis et al., 1997).

Més endavant l'any 2003 la *International Olympic Committee* (IOC) va publicar el concepte de *energy availability* (Burke, 2003) i el 2007 la ACSM va realitzar una actualització on detallava que no era necessari tenir cap trastorn

alimentari per ser diagnosticada de la triada de l'atleta femenina (Nattiv et al., 2007).

No va ser fins el 2014 que el IOC va publicar un consens del *Relative Energy Deficiency in Sports* (RED-S), que podríem dir que és una evolució de la triada en la que es contemplen molts més aspectes fisiològics que repercuteixen tant en la salut com en el rendiment en aquells atletes que pateixen *low energy availability* (LEA) en relació al gast energètic durant la pràctica d'exercici (Mountjoy et al., 2014). En el 2018 es va realitzar una segona actualització en la que informaven que els atletes masculins també podien tenir RED-S (Mountjoy et al., 2018). La última actualització s'ha realitzat recentment en el 2023, en la qual han modificat lleument la nomenclatura a REDs i han incorporat un nou model fisiològic (**Figura 7**) que inclou problemàtiques individuals i noves mesures per la prevenció i el diagnòstic clínic (Mountjoy et al., 2023).

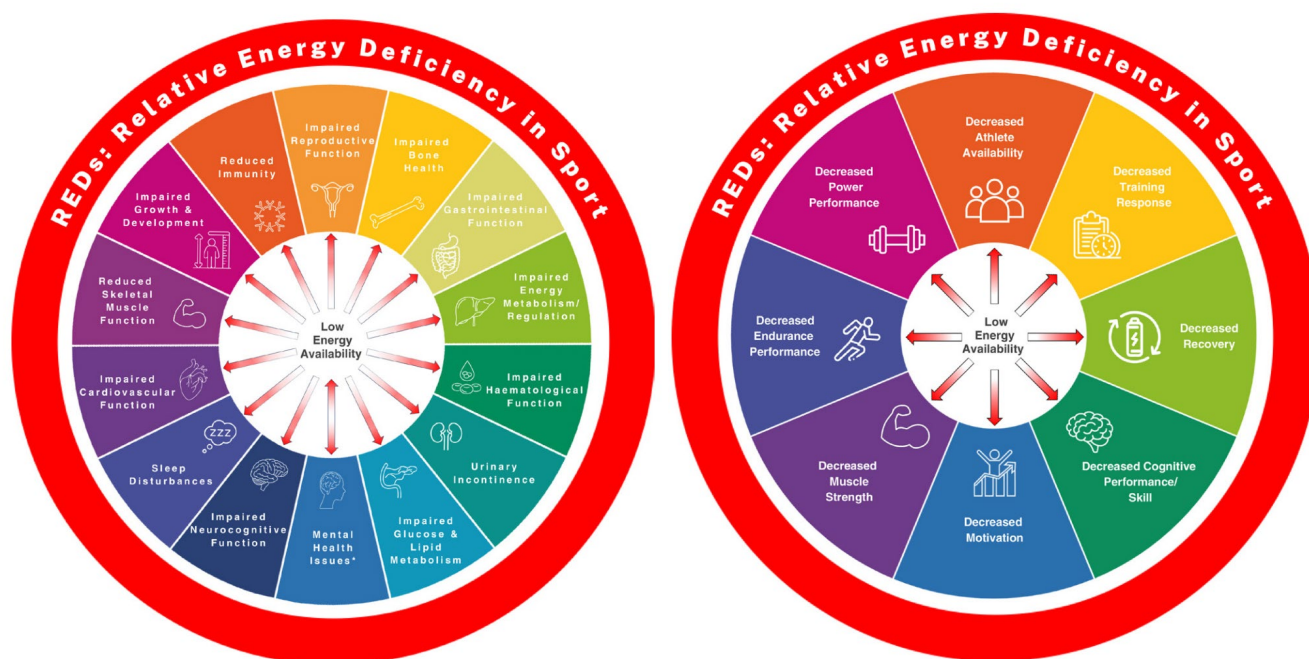


Figura 7. Models conceptuals del REDs en la salut i el rendiment. Adaptada de (Mountjoy et al., 2023).

Podríem entendre el REDs com un LEA crònic. La progressió d'una situació sana a una de més patològica evoluciona en el temps i per exemple a nivell

hormonal podem observar CM de duracions normals, però cicles anovulatoris o fases lúties deficientes que progressivament evolucionen a cicles més llargs o a patir una amenorrea hipotalàmica. Acompanyat d'una reducció de la ingesta i una alta càrrega d'entrenament més un *under-recovering* pot evolucionar a un LEA crònic i consegüentment també tenir problemes de salut òssia (Logue et al., 2020).

Les causes principals del REDs es centren en un LEA degut a una baixa ingesta calòrica o bé per un augment de la despesa energètica consegüent a un increment de la càrrega de l'entrenament (*overreaching/overtraining*) o una falta de recuperació (*under-recovering*), com podria ser el cas de les temporades competitives. Els nivells principals d'afectació del REDs són a nivell neuro-endocrí, menstrual, immunitari, muscular i ossi (Mountjoy et al., 2023). Pel que fa a les alteracions menstruals conseqüència del REDs, es considera que controlar l'ovulació és el mètode *Gold Standard* com a eina de cribratge d'alguna irregularitat menstrual (De Souza et al., 1998).

4. L'ús d'anticonceptius hormonals en les atletes femenines

Els resultats d'una enquesta a una població d'atletes va mostrar que la meitat utilitzava anticonceptius hormonals (AH) (49,5%) i d'aquests el més comú era l'anticonceptiu oral (AO) (68,1%), convertint-se en el segon perfil hormonal més habitual després del CM (Martin et al., 2018). En comparació amb el 40% d'usuàries d'AH en la població general (Lindh et al., 2017). Tot i la gran prevalença de població esportista usuària de AO els efectes d'aquest en el rendiment són encara escassos (Elliott-Sale et al., 2020).

L'ús dels AH altera la fluctuació fisiològica de les hormones femenines actuant a nivell de les hormones gonadotropines a través d'un feedback negatiu, mantenint el nivell de les hormones endògenes (E2 i P4) baix. L'objectiu principal de l'ús d'anticonceptius com el seu nom indica és l'anticoncepció i el control de la fertilitat. Tot i així, els AH també s'utilitzen per controlar la simptomatologia

associada a alteracions del CM com la dismenorrea i la menorràgia (Elliott-Sale et al., 2020).

Existeixen diferents tipus d'AH en funció de la seva forma d'administració: oral, implant, injeccions, anell vaginal, pegat i dispositiu intrauterí (DIU), composició: progestina sola o progestina combinada amb estrògens sintètics i dosi. Els anticonceptius orals poden ser monofàsics: amb concentracions hormonals constants al llarg del temps, bifàsics: amb diferents dosis hormonals en dos períodes al llarg del cicle, o trifàsics: amb diferents dosis hormonals en tres períodes al llarg del cicle (INFAC, 2022) (**Figura 8**). S'han produït quatre generacions d'AO combinats que es diferencien per la naturalesa i les concentracions de progestines que contenen (Tracy, 2017). La classificació actual dels anticonceptius orals combinats (AOC) en quatre generacions diferents es basa en la progestina utilitzada: els AOC de primera generació inclouen les píndoles que contenen noretisterona i acetat de noretindrona; Els AOC de segona generació contenen levonorgestrel; els de tercera generació contenen desogestrel, gestodè i norgestimant; i els AOC de quarta generació inclouen drospirenona o qualsevol altra nova progestina (International Planned Parenthood Federation, 2013)

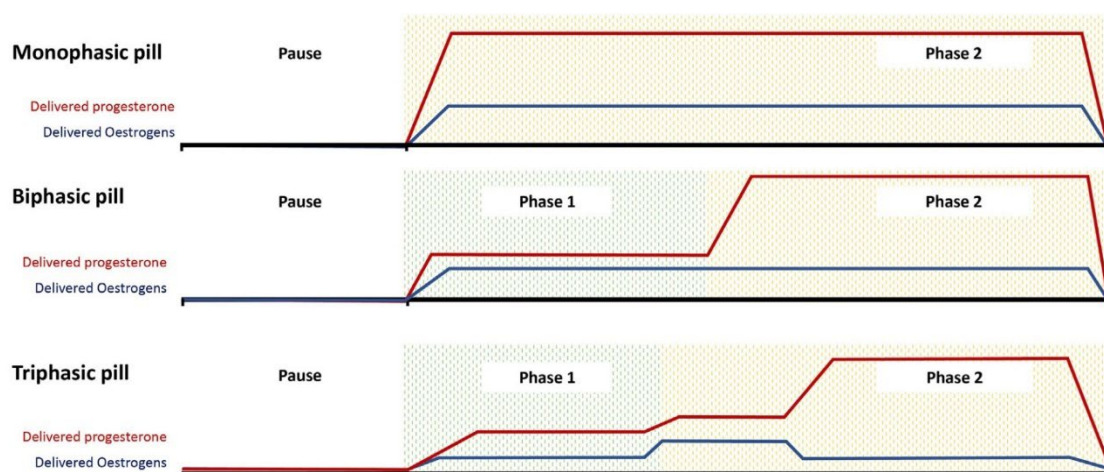


Figura 8. Fases hormonals induïdes per anticonceptius orals. Adaptada de (Antero et al., 2023).

Entre un 60 i 74% de la població d'atletes utilitza l'AO combinat monofàsic de segona generació, que conté una dosi baixa d'etinilestradiol i es combina amb levonorgestrel, noretisterona, desogestrel o gestodene, durant 21 dies (fase activa

d'hormones (FAH)) seguit de 7 dies d'AO (fase no activa hormonal (FNAH) o placebo). Durant aquests dies de fase passiva es quan es pot produir el que s'anomena sagnat per deprivació. Els AO només de progestines es consumeixen en una població més reduïda (Elliott-Sale et al., 2020; Martin et al., 2018).

Els estudis han demostrat que els AO no només tenen efectes en reduir la simptomatologia associada als CM, també té beneficis en tractar fibromes simptomàtics, quists ovàrics, patologia mamària benigna i disminueixen la patologia inflamatòria pelviana (Elliott-Sale et al., 2020). Addicionalment, s'han observat millores en la densitat mineral òssia (DMO) que pateixen dones amb una deficiència d'estrògens com és el cas d'anorèxia nerviosa, amenorrea hipotalàmica o insuficiència ovàrica prematura (Ampatzis et al., 2022). Així mateix, un percentatge alt de la població atlètica femenina (47%) ha reportat utilitzar estratègicament els AO per controlar, retardant o suprimint, els dies de sagnat per tal que aquests no coincideixin amb competicions esportives i així eliminar les molèsties percebudes (Ekenros et al., 2022; Martin et al., 2018).

D'altra banda, l'ús d'AH també té uns efectes secundaris associats. (Ekenros et al., 2022) van notificar que el 40% d'atletes enquestades patien efectes adversos, principalment la sensibilitat mamària i la disminució de la libido. Els efectes adversos percebuts entre usuàries d'AO combinats o dominants d'estrògens o progestines van ser similars, sent els canvis d'humor el més habitual. Contràriament, s'han registrat més efectes secundaris en usuàries d'AO únicament de progestina, en comparació amb els AO combinats (Martin et al., 2018).

Un metaanàlisis recent va concloure que l'ús d'AO combinats pot reduir lleugerament el rendiment físic en comparació amb les atletes que no utilitzen AH (Elliott-Sale et al., 2020). El 47 % d'atletes ha expressat una variació en el seu rendiment esportiu durant l'ús d'AO, principalment percebent un impacte negatiu durant els dies de fase inactiva, pel que fa als aspectes físics, mentals i de la qualitat del son (Ekenros et al., 2022).

A la **Taula 5** es mostra una representació sintètica dels diferents tipus d'AH (INFAC, 2022).

Taula 5. Concentracions hormonals d'anticonceptius hormonals.

ANTICONCEPTIUS HORMONALS COMBINATS D'ESTRÒGENS I PROGESTINES		
Estrogen	Progestina	Presentació
Formes orals		
Monofàsics		
Etinilestradiol 35 µg	Norgestimat 250 µg	21 comprimits
Etinilestradiol 30 µg	Levonorgestrel 150 µg	21-91 comprimits
	Clormadinona 2 mg	21-28 comprimits
	Desogestrel 150 µg	21 comprimits
	Gestodene 75 µg	21 comprimits
	Drospirenona 3 mg	21-28 comprimits
	Dienogest 2 mg	21-28 comprimits
	Etinilestradiol 20 µg	Levonorgestrel 100 µg
Desogestrel 150 µg		21 comprimits
Gestodene 75 µg		21-28 comprimits
Drospirenona 3 mg		21-28 comprimits
Etinilestradiol 15 µg	Gestodene 60 µg	28 comprimits
Hemihidrat d'estradiol 1,5 mg	Nomegestrol 2,5 mg	28 comprimits
Monofàsics amb efecte antiandrogènic		
Etinilestradiol 35 µg	Ciproterona 2 mg	21-28 comprimits
Bifàsics (dies 1-7 i 8-22)		
Etinilestradiol (40-30 µg)	Desogestrel (25-125 µg)	22 comprimits
Trifàsics (dies 1-6; 7-11 i 12-21)		
Etinilestradiol (30-40-30 µg)	Levonorgestrel (50-75-125 µg)	21 comprimits
	Gestodene (50-70-100 µg)	
Formes no orals		
Etinilestradiol 600 µg	Norelgestromina 6 mg	3-9 pegats
Etinilestradiol 2,7 mg	Etonogestrel 11,7 mg	1-3 anells vaginals
ANTICONCEPTIUS HORMONALS NOMÉS DE PROGESTINES		
Progestina	Duració	Presentació
Formes orals		
Desogestrel 75 µg	1 mes	28 comprimits
Drospirenona 4 mg	1 mes	28 comprimits
Formes no orals		
Medroxiprogesterona acetat 150 mg	3 mesos -5 anys	1 vial intramuscular
Etonogestrel 68 mg		implant
Levonorgestrel 52 mg (20 µg/24 h.)		DIU
Levonorgestrel 13,5 mg		
Levonorgestrel 19,5 mg		

Adaptada de (INFAC, 2022).

5. Efectes fisiològics de les hormones femenines

En aquest capítol s'aprofundirà en els efectes fisiològics dels dos grups d'hormones més rellevants; estrògens i progestàgens. Del grup dels esteroides estrògens endògens el tipus més predominant és el 17β -estradiol i dels progestàgens és la progesterona que alliberen principalment els ovaris (Longcope, 1986). De les hormones femenines sintètiques observem l'etinilestradiol i el mestranol i els diferents tipus de progestines de primera, segona, tercera i quarta generació (Elliott-Sale et al., 2020). Tant les hormones endògenes com les exògenes exerceixen uns efectes en diversos processos biològics que poden afectar el rendiment esportiu i en conseqüència poden existir diferències significatives respecte el sexe masculí (Charkoudian & Joyner, 2004).

Abans d'entrar en detall en les diferents respostes fisiològiques, cal mencionar que a la bibliografia existeixen disparitat de resultats i per tant encara no queda clar si les hormones femenines tenen efectes i si aquests són beneficiosos o nocius. D'altra banda, en línies generals, els estrògens i la progesterona tenen efectes fisiològics antagonistes.

5.1. Efectes fisiològics del 17β -estradiol

La **Figura 9** il·lustra els diferents efectes del 17β -estradiol en funcions biològiques i sistemes.

5.1.1. Funció cardiovascular

En general els estrògens es consideren protectors de la salut cardiovascular i la hipertensió. Un exemple molt il·lustratiu d'aquest paper pot ser vist en dones menopàusiques en les quals el nivell d'E2 es redueix dràsticament (Moreau et al., 2012). Els E2 juguen un paper clau en la funció endotelial, millorant la vasodilatació de la musculatura llisa de les artèries coronàries i dels llits vasculars perifèrics, gràcies a la producció d'òxid nítric (ON) i prostaciclina (Chakrabarti et al., 2014;

Knowlton & Lee, 2012). Addicionalment, aquesta hormona confereix un paper protector en contra de l'arterioesclerosi disminuint la quantitat total de colesterol juntament amb el nivell de *low density lipoprotein* (LDL) i augmentant els nivells de *high-density lipoprotein* (HDL) (Lebrun et al., 2020). La substitució dels estrògens endògens per hormones sintètiques amb l'ús d'anticonceptius ha mostrat també millores en la funció vascular i endotelial (Rickenlund et al., 2005). Aquesta millora de la funció endotelial i l'augment del subministrament de sang al cor i als músculs, ha conduït a la hipòtesis que la presència d'E2 podria millorar el rendiment aeròbic.

5.1.2. Metabolisme i utilització de substrats energètics

En situació de repòs els E2, i en menor mesura la P4, sembla que tenen una tendència en captar i emmagatzemar glucogen en els músculs i el fetge. Aquesta conservació de carbohidrats condueix a optimitzar l'ús de àcids grassos lliures (Hackney, 1990). La tendència a la lipogènesis en el múscul és gràcies a la inducció de la lipoproteïnalipasa i la millor utilització d'àcids grassos lliures, s'ha observat en fase lúcia, on ambdós hormones hi són presents, en exercicis d'intensitat submàxima (Hackney, 1999) i una menor producció d'àcid làctic (Oosthuyse & Bosch, 2010). A nivell del paper que tenen els E2 en el metabolisme de les proteïnes s'ha observat com disminueixen el catabolisme proteic en la fase fol·licular quan aquests es troben en concentracions més elevades (Hauswirth & Le Meur, 2011). Els E2 regulen el metabolisme de la glucosa juntament amb la hormona del creixement (GH), les catecolamines i la insulina (Wallach et al., 1988). Aquesta hormona ovàrica sembla que produeix un deteriorament en la tolerància de glucosa i una resistència a la insulina, degut a una disminució de la capacitat de fixació d'aquesta (Godsland, 2005). Paradoxalment, en dones en tractament de reemplaçament hormonal la incidència de la diabetis tipus II es veu disminuïda. En canvi, administracions suprafisiològiques d'E2 de curta durada, causen un increment en la resistència a la insulina (Godsland, 2005).

5.1.3. Composició corporal

Està ben estudiat com els E2 actuen en els caràcters físics femenins com la presència de greix als pits, cuixes i la zona del glutis (Hall & Hall, 2021). Pel que fa a l'equilibri de líquids aquesta hormona augmenta la retenció de clorur i sodi que comporta un edema i un increment del pes corporal. A més a més, augmenta la pressió sanguínia (PS) i el volum plasmàtic (VP) degut a les alteracions hemodinàmiques per la llei de Starling (Oian et al., 1987).

Els efectes fisiològics dels E2 en la remodelació i la formació de l'os tenen evidències fermes. Aquesta hormona inhibeix la resorció òssia, activitat realitzada per els osteoclasts, i estimula la formació d'os gràcies a l'estimulació de l'activitat dels osteoblasts (Chen et al., 2009; Michael et al., 2005). La deficiència crònica d'E2, que ocorre en la menopausa o en casos d'amenorrea, condueix a una regressió de la densitat mineral òssia i per tant pot conduir a osteopenia o osteoporosis i en conseqüència augmenta el risc de fractures. En aquest punt, cal mencionar també que una baixa disponibilitat energètica, com en el cas d'un REDs (**Capítol 3.4.**), també interfereix en el creixement a través de l'eix *growth hormone-insulin-like growth factor* (GH-IGF) (Ackerman & Misra, 2011). L'administració d'anticonceptius orals provoca diferents canvis en el pes, la composició corporal i la densitat mineral òssia, en funció del perfil hormonal (Rickenlund et al., 2004).

5.1.4. Termoregulació

Els E2 modifiquen els efectes de la P4 en la termoregulació actuant directament en el teixit hipotalàmic (Silva & Boulant, 1986), disminuint la temperatura corporal durant la fase preovulatòria versus la fase lútea mitja en situació de repòs (Stephenson & Kolka, 1999). Una de les hipòtesis que pot explicar aquesta acció perifèrica és l'efecte en l'endoteli vascular incrementant la vasodilatació cutània per part dels E2 (Chakrabarti et al., 2014). L'ús d'anticonceptius orals combinats amb estradiol i noretindrona, una forma exògena de progesterona, no comporta un augment de la temperatura corporal, en comparació amb l'ús d'anticonceptius únics de progesterona (Stachenfeld et al., 2000).

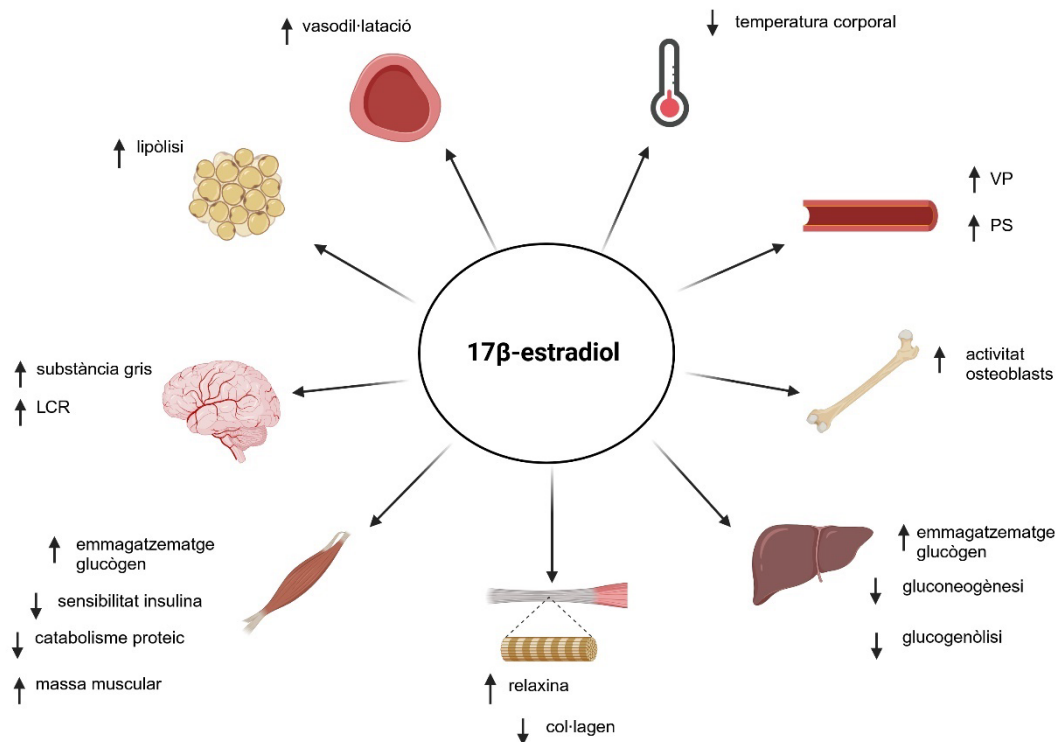


Figura 9. Efectes fisiològics del 17β-estradiol. LCR: líquid cefalorraquidi, VP: volum plasmàtic, PS: pressió sanguínia.

5.1.5. Funció cerebral

S'observa un increment dels estudis que relacionen els E2 amb aspectes cognitius, del comportament, estat anímic i la son, possiblement per canvis en la disponibilitat de certs neurotransmissors com la serotonina (Halbreich & Tworek, 1993), en àrees del cervell com l'hipocamp o el còrtex. També s'han observat canvis morfològics en el cervell al llarg del CM, amb un augment de la substància gris i el volum del líquid cefalorraquidi (LCR) en el moment de l'ovulació, amb una significativa correlació amb el nivell dels E2 al llarg de la fase F (Hagemann et al., 2011; Luine, 2014). En dones post menopàusiques els E2 milloren la memòria verbal i la funció cognitiva (Sherwin, 1996). Els anticonceptius basats en estrògens han demostrat una millora de la memòria verbal tan sols en els dies de fase activa de l'anticonceptiu (Mordecai et al., 2008).

5.1.6. Propietats del teixit conjuntiu: lligaments i tendons

Elements del teixit conjuntiu, com els lligaments i els tendons contenen receptor d'E2 (Bridgeman et al., 2010; Liu et al., 1996). Els E2 poden afectar les propietats de tracció dels lligaments (Chandrashekar et al., 2006) i poden influir en la renovació de col·lagen present en el teixit conjuntiu, degut a la presència de receptors d'E2 en lligaments, concretament en fibroblasts de l'estroma del LEA (lligament encreuat anterior) (Liu et al., 1996). En atletes lesionades per trencament del LEA s'han monitoritzat nivells de relaxina elevats (Dragoo et al., 2011). La relaxina es una hormona peptídica que es creu que esta mediada per l'alliberació de col·lagenases i s'ha observat com la seva presència debilita el LEA durant l'exercici de força (Dragoo et al., 2009). Per tant, existeix la hipòtesis que la relaxina pugui alterar l'estructura del col·lagen i la flexibilitat del LEA amb un conseqüent augment de risc de lesions (Dragoo et al., 2011). El tractament de cèl·lules en cultiu amb E2 disminueix la ràtio col·lagen/elastina. Malgrat els resultats contradictoris en relació als efectes de l'E2 pel que fa la síntesi de col·lagen, sembla que la rigidesa i la resistència general del teixit disminueix (Chidi-Ogbolu & Baar, 2019).

També s'han observat menors concentracions de col·lagen en tendons i fàscies amb presència d'E2 (Fischer, 1973). Una possible causa que explicaria l'augment de col·lagen en els tendons es relaciona amb un efecte indirecte del *insulin like growth factor 1* (IGF-1), modulats directament per l'E2. D'altra banda, també s'ha observat com l'E2 pot disminuir la rigidesa del tendó actuant directament en la inhibició de la lisil oxidasa (LOX) disminuint els enllaços creuats (Chidi-Ogbolu & Baar, 2019). Un adequat equilibri de la rigidesa en els tendons és clau per mantenir la integritat del sistema. Atès que, un excés de rigidesa tendinosa s'associa amb un major treball excèntric del múscul i en conseqüència major risc de lesió d'aquest (LaStayo et al., 2003). Altres estudis han observat com una menor rigidesa múscul-tendinosa en el genoll en la fase ovulatòria, és a dir una menor contribució de les estructures elàstiques passives, comporta una major dependència de la resposta reflexa per part dels components contràctils del múscul i en conseqüència un retard en l'increment de la resposta electromecànica que es pot traduir en un major risc de lesió (Eiling et al., 2007).

La resposta de l'ús dels anticonceptius en el teixit conjuntiu varia significativament segons la bibliografia, mostrant resultats inconsistents entre els diferents estudis (Chidi-Ogbolu & Baar, 2019).

5.1.7. Equilibri i balanceig postural

Tal com s'ha comentat anteriorment, la presència de receptors d'estrògens i progesterona localitzats en el sistema múscul-esquelètic i el sistema nerviós podrien modificar les propietats, la resistència, la síntesis i proliferació, l'estructura i com a tal la funció d'aquests teixits i estar relacionats amb certs canvis en l'estabilitat postural i l'equilibri (Lee et al., 2017; Reschechtko et al., 2023; Yim et al., 2018). S'ha observat com l'equilibri depèn de factors sensorials i motors (Mancini & Horak, 2010) i el balanceig postural està regulat pel sistema nerviós central (SNC) (Carpenter et al., 2010). L'equilibri fa referència a la capacitat de mantenir el cos en una posició estable, ja sigui estàtica o dinàmica, resistint l'acció de la gravetat. És essencial per mantenir el centre de gravetat dins de la base de suport, tant en repòs (equilibri estàtic) com en moviment (equilibri dinàmic). Aquest procés implica una interacció complexa entre el sistema múscul-esquelètic i el sistema nerviós, que utilitza informació sensorial (visual, vestibular i somatosensorial) per regular la postura i prevenir caigudes. En canvi el balanceig postural es refereix als petits moviments o oscil·lacions que el cos realitza per mantenir l'equilibri en resposta a canvis interns o externs. Aquest fenomen és més evident en situacions d'estabilitat estàtica, com quan estem drets sense moure'ns. El balanceig ajuda a ajustar constantment el centre de gravetat dins de la base de suport i és un indicador del control postural actiu. Tot i que l'equilibri i el balanceig no són exactament el mateix, es postula que a majors nivells de balanceig postural existeix un deteriorament de l'equilibri i en conseqüència una major taxa de caigudes (Johansson et al., 2017).

5.1.8. Funció muscular

Són ben coneguts els efectes metabòlics dels E2 a la musculatura. Modulen directament les propietats de la membrana i la funció energètica de les

mitocòndries, influint en la homeòstasis energètica (Torres et al., 2018). A més, l'E2 pot regular gens i dianes moleculars en el múscul esquelètic (Enns & Tiidus, 2010) facilitant la interacció entre l'actina i la miosina (Lowe et al., 2010). Tot i que, l'efecte dels E2 sobre el múscul humà no està clar, en models animals té una efecte beneficiós en la força i la massa muscular (Kitajima & Ono, 2016; McClung et al., 2006). La massa muscular depèn en gran mesura de l'equilibri entre la síntesi i la degradació de les proteïnes musculars i sembla que l'E2 no millora la síntesis proteica muscular, tot i així augmenta la resposta anabòlica a l'exercici i en conseqüència pot donar lloc a un augment de la massa muscular (Chidi-Ogbolu & Baar, 2019). Addicionalment, promou la secreció de la GH (Lebrun et al., 2020). Pel que fa la força muscular es creu que l'E2 té un efecte inotrópic (Greising et al., 2009). També s'ha observat com aquesta propietat millora durant l'ovulació en els músculs flexors i extensors de genoll (Bambaeichi et al., 2004).

El tractament agut d'estrògens disminueix la síntesis proteica muscular basal, però, d'altra banda, augmenta la resposta anabòlica a l'exercici (Hansen et al., 2012). Aspecte que podria justificar l'augment de la massa muscular en estudis a llarg termini (Chidi-Ogbolu & Baar, 2019). L'ús d'anticonceptius orals monofàsics no ha mostrat canvis en les propietats musculars (Bell et al., 2011).

5.2. Efectes fisiològics de la progesterona

La **Figura 10** il·lustra els diferents efectes de la progesterona en diferents funcions biològiques i sistemes fisiològics.

5.2.1. Funció respiratòria

Les hormones sexuals estan involucrades en el control neural de la respiració (Behan et al., 2003). En múltiples estudis, s'ha descrit el paper de la progesterona en paràmetres ventilatoris, com l'augment de la ventilació ($\dot{V}_E$) i la resposta ventilatòria a la hipòxia i la hipercàpnia quan els nivells d'aquesta hormona són elevats (Macnutt et al., 2012; Schoene et al., 1981). La presència de P4 augmenta la sensibilitat dels quimiorceptors de l'hipotàlem, disminuint el

llindar del centre respiratori medullar i augmentant així la $\dot{V}_E$ (Behan & Wenninger, 2008; Janse de Jonge, 2003; Samsudeen & Rajagopalan, 2016) i fins i tot el consum màxim d'oxigen ($\dot{V}O_2$ max) (Goldsmith & Glaister, 2020). S'ha observat com receptors de la progesterona en el nucli hipoglòs innerven músculs dilatadors de les vies aèries superiors (Boukari et al., 2017). Quan ambdós hormones, E2 i P4, es troben en concentracions elevades, situació que passa durant la fase lúcia mitja, l'augment en la ventilació es veu potenciat induint l'expressió de receptors de progesterona (Brodeur et al., 1986). S'ha de mencionar que altres estudis no han mostrat canvis significatius en la ventilació en presència de P4 (Hackney et al., 1991), aquestes discrepàncies podrien ser degudes a múltiples factors com l'estat d'entrenament de les persones estudiades o diferències metodològiques en la determinació hormonal. L'estudi de l'efecte de l'ús d'anticonceptius hormonaals orals no ha aportat resultats concloents, en part degut a l'amplia variabilitat dels AOs que pot crear cicles monofàsics o multifàsics (Elliott-Sale et al., 2020).

5.2.2. Metabolisme i utilització de substrats energètics

Durant la fase L on la P4 es troba en els seus nivells més alts, provoca una tolerància relativa a la glucosa i una resistència a la insulina, afavorint la utilització de greixos, degut a la disminució de la gluconeogènesis (Hackney, 1999), denotat per menors taxes de *respiratory exchange ratio* (RER) i nivells de lactat més baixos durant exercici submàxim (Hackney et al., 2000). Igual que els E2, però en menor mesura, la P4 té una tendència a emmagatzemar glucogen en el múscul i el fetge (Hackney, 1990), en canvi una tendència més gran a sintetitzar àcids grassos que els E2 (Hansen et al., 1980). En el metabolisme proteic la P4 promou el catabolisme influint en l'oxidació d'aminoàcids. Sembla que és més accentuat en la fase L que la fase F, tant en repòs com durant l'exercici (Lebrun et al., 2020). En un estudi on volien observar si el CM tenia alguna influència en els substrats plasmàtics relacionats amb l'exercici prolongat van veure menors concentracions d'aminoàcids en plasma en la fase L mitja en comparació amb la fase (Bailey et al., 2000). Hi ha molts tipus i concentracions de progesterona sintètica, i sembla que totes elles tenen un efecte en la tolerància a la glucosa i els nivells d'insulina, tot i

que les de tercera i quarta generació (desogestrel, gestodene i norgestimat) redueixen aquest impacte (Lopez et al., 2012).

5.2.3. Composició corporal

La P4, a través d'un complex feedback amb el sistema renina-angiotensina i aldosterona, augmenta la retenció de líquids (Stachenfeld, 2008). En la fase L mitja on les hormones ovàriques es troben en una major concentració i tenint en compte el seu paper en la retenció de fluids poden provocar aquest conseqüent augment de pes que ha portat a pensar que pot disminuir el rendiment. Tot i així, no s'ha correlacionat significativament la tensió de les mames, símptoma premenstrual habitual, amb la retenció de líquids (Olson et al., 1996).

5.2.4. Termoregulació

Existeix una ampla evidència sobre la influència de la progesterona en la termoregulació en dones eumenorreiques (Janse de Jonge, 2003; Lei et al., 2019; Pivarnik et al., 1992), en l'ús d'anticonceptius únics de progesterona (Stachenfeld et al., 2000) i en embarassades (Buxton & Atkinson, 1948). La temperatura basal del cos augmenta 0.3-0.5°C durant la fase L mitja degut a una alteració del punt d'ajust de la termoregulació (Janse de Jonge, 2003). Sembla que el mecanisme que explica aquest efecte seria una acció central de la P4 en l'àrea preòptica (Nakayama et al., 1975). Altres estudis han especulat que aquesta desregulació a nivell de l'hipotàlem està relacionada amb la ràtio P4/E2 (Cagnacci et al., 1997). Per tal de dissipar aquest augment de temperatura el flux sanguini a la pell es veu incrementat i conseqüentment el flux sanguini central es redueix. Per tant, amb l'objectiu de mantenir el cabal cardíac ($\dot{Q}$), la freqüència cardíaca (FC) i l'esforç cardiovascular es poden veure augmentats (Janse de Jonge, 2003; Lebrun, 1993). Altres mecanismes fisiològics associats són l'augment del llindar de vasodilatació cutània i el retard en l'inici de la sudoració (Hessemer & Brück, 1985).

5.2.5. Funció cerebral

S'han observat possibles efectes neuroprotectors per part de la P4, els mecanismes subjacents que poden explicar aquest efectes estan relacionats amb l'expressió de neurotrofines (Kaur et al., 2007) que poden promoure, també, la supervivència cel·lular (Singh & Su, 2013). En un estudi recent, es va observar com la duració total del son nocturn i la vigília un cop s'ha iniciat el son s'han associat amb el número de símptomes al llarg d'un CM. Altres paràmetres del son com la qualitat subjectiva del son o el temps emprat abans de quedar-se adormida no es veuen afectat amb els símptomes reportats (Halsen et al., 2024). També s'han estudiat els efectes entre diferents grups d'anticonceptius i sembla que les progestines de tercera generació (androgènics) afecten positivament la fluència verbal en comparació amb les progestines de nova generació (antiandrogènics) i l'habilitat mental rotacional en vers CM (Griksiene & Ruksenas, 2011).

5.2.6. Propietats del teixit conjuntiu: lligaments i tendons

La P4 al igual que els E2 afecten la propietat de tracció dels lligaments (Chandrashekar et al., 2006) i també s'han localitzat receptors hormonals en lligaments (Liu et al., 1996). La P4 exerceix una influència significativa en l'estructura dels teixits del sistema múscul-esquelètic, augmentant el contingut de collagen a la càpsula articular del maluc (Yamamuro et al., 1977). No s'han observat canvis en les propietats tendinoses relacionades amb la concentració de P4 (Burgess et al., 2009).

5.2.7. Funció muscular

La P4 contràriament a l'E2, sembla que no té efectes en la força ni en la funció muscular. S'ha observat una síntesis de proteïnes musculars mixtes en dejú en dones post-menopàusiques al rebre P4 o testosterona, però no quan rebien una dosi aguda d'E2 (Smith et al., 2014). Contràriament, l'ús d'anticonceptius orals amb dosis altes de progesterona exògena té un impacte negatiu en el múscul (Hansen et al., 2011).

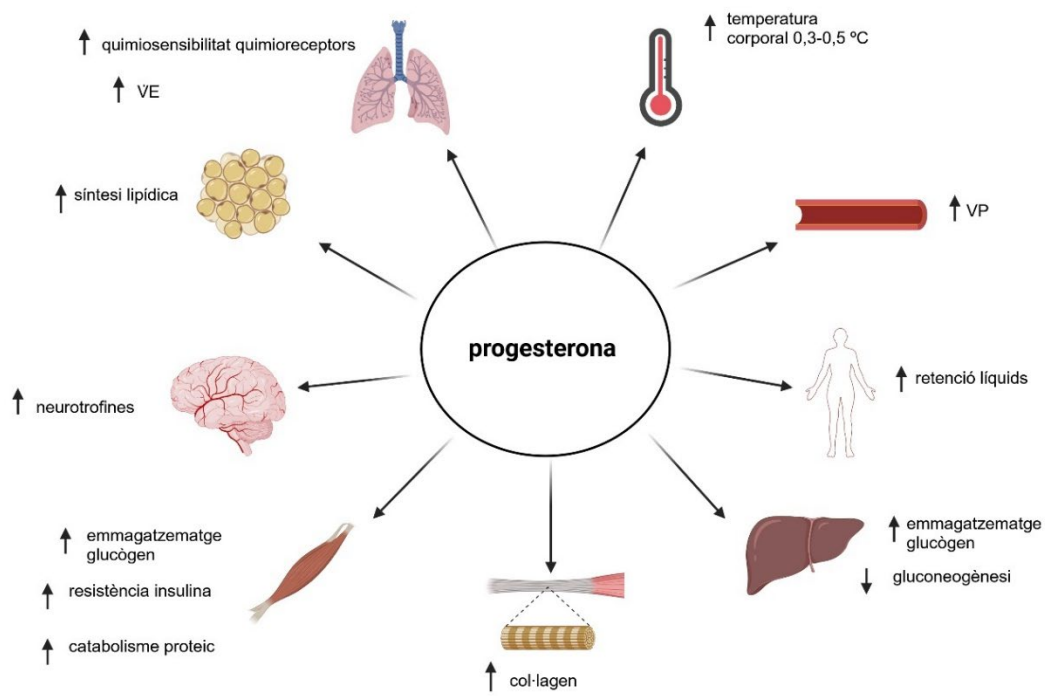


Figura 10. Efectes fisiològics de la progesterona. $\dot{V}_E$: ventilació pulmonar, VP: volum plasmàtic.

6. Cicle menstrual i rendiment esportiu

Podria semblar que tot el que té relació amb la dona i l'esport és una moda. Saber si s'ha d'entrenar o no en funció de les fases del CM, si són necessaris suplementos nutricionals específics els dies de la menstruació o certs aliments per cada fase del cicle, quin tipus d'exercici físic és el més convenient durant l'embaràs, el post-part o la menopausa són preguntes que la comunitat científica intenta respondre amb més interès des de fa un parell de dècades. Certament el volum de treballs en relació a la fisiologia femenina i l'exercici físic ha incrementat exponencialment, però seria un error pensar que és una moda de principis del segle XXI.

Mary Putman Jacobi, la primera dona acceptada a la prestigiosa facultat de medicina de la Sorbona, va escriure el primer assaig científic basat en dades sobre la biologia reproductiva de la dona l'any 1876, titulat *"The question of rest for women during menstruation"* (**Figura 11**). El treball plantejava la necessitat del descans mental i físic en els dies de la menstruació (Jacobi, 1876). En una època en la que la menstruació es considerava una malaltia, aquest assaig va permetre a l'autora ser la primera dona en guanyar el prestigiós premi Mèdic Boylston de Harvard (Reeder, 2024). L'assaig científic contenia qüestionaris on preguntava a les enquestades sobre la seva menstruació; el temps que durava el sagnat i amb quina intensitat, si sentien dolor, si podien caminar, quantes hores passaven a la feina o a l'escola. Preguntes que no difereixen gaire dels qüestionaris actuals. A més a més, va registrar la freqüència cardíaca de les voluntàries, la seva força muscular i la seva temperatura corporal. L'estudi va concloure que les mesures i les cures durant la menstruació havien de ser totalment individuals, amb especial importància unes bones condicions higièniques pel que fa a l'alimentació, l'aire pur i l'exercici (Jacobi, 1876).

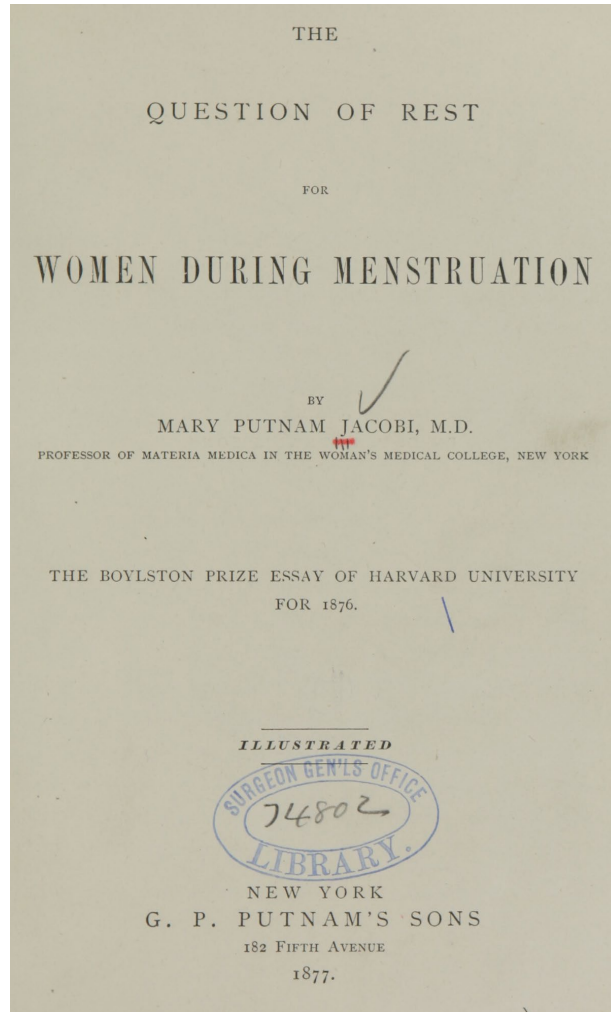


Figura 11. Portada de l'assaig científic *"The question of rest for women during menstruation"*. (Jacobi, 1876).

Més endavant, en el 1939 Hans Selye el reconegut fisiòleg pare de la teoria del "Síndrome General d'Adaptació", va reportar com un increment brusc del volum i la intensitat d'exercici muscular interrompia els cicles sexuals i provocava una involució de les gònades en rates femelles. En aquests treballs van observar que no només l'exercici intens sinó també una ingesta insuficient provocava una atròfia dels òrgans sexuals femenins. Aquest resultat s'interpretava com una reacció de l'organisme adaptant-se a un canvi extern en l'ambient. Davant d'un estat d'emergència la glàndula pituïtària no fa una regressió general, sinó que tendeix a hipertrofiar el còrtex adrenal produint més hormona corticotropina i menys hormona gonadotropina com a manifestació del principi de supervivència per sobre de la preservació de la funció sexual normal (Selye, 1939). Ja en el 1953 trobem el

primer article que mostra una possible reducció del rendiment muscular durant els dies de menstruació (Devi & Reddy, 1953).

Tenint en consideració els múltiples efectes de les hormones ovàriques (E2 i P4) en els diferents sistemes corporals i funcions biològiques (**Capítol 5**), no és estrany pensar que el CM pugui influir en el rendiment esportiu. Al examinar la literatura científica, s'han estudiat diferents àrees del rendiment esportiu i com les diferents fases del CM poden modificar-lo (**Figura 12**). És important mencionar, que en totes les temàtiques s'observen resultats en ambdós direccions. Aquestes discrepàncies poden ser multi causals, d'una banda degut a la diversitat de protocols utilitzats, les poc homogènies definicions de les diferents fases del CM i els diferents perfils hormonals (Elliott-Sale et al., 2021), així com la variació del ritme circadiari en la secreció hormonal, la variabilitat de les franges horàries en el moment de realitzar les proves, el nivell d'hidratació, l'estat nutricional i els diferents nivells d'intensitat d'exercici (Lebrun et al., 2020). A més a més, cal considerar les especificacions de la població en relació al seu nivell d'entrenament (no entrenades, actives o professionals) (Lebrun et al., 2020). Altres aspectes que poden esbiaixar els resultats són les petites mides de mostra estudiades i la variabilitat individual que caracteritza els estudis centrats en els efectes de les hormones femenines (Elliott-Sale et al., 2021).

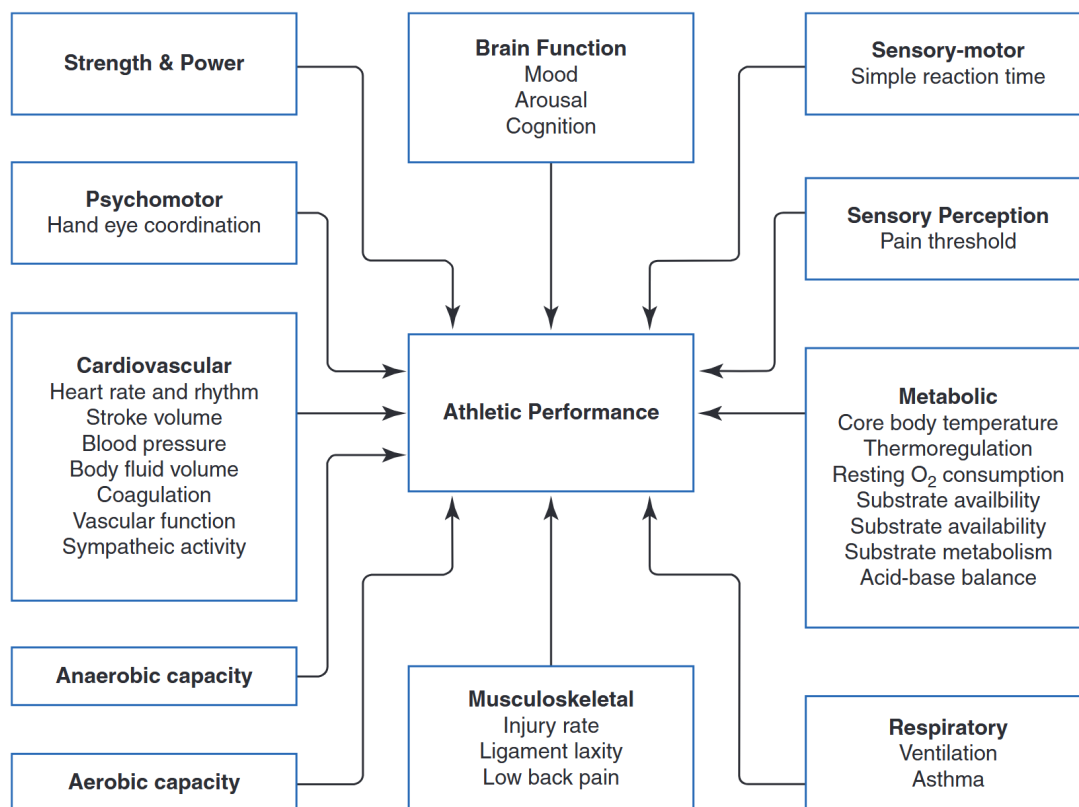


Figura 12. Components del rendiment físic que es poden veure afectats pel cicle menstrual (Lebrun et al., 2020).

Tot i que el CM pot tenir repercussions en molts àmbits del rendiment físic, a continuació s'explicaran aquells components que han tingut rellevància i que hem tractat més al detall en els estudis experimentals d'aquesta tesi, com són les propietats musculars i el risc de lesions, la resposta cardiovascular, el rendiment aeròbic i la resposta a la hipòxia.

6.1. Propietats mecàniques del múscul

Un limitat volum de literatura tracta les propietats mecàniques del múscul i la influència que puguin tenir les fases del CM. La majoria d'estudis estan focalitzats en el rendiment i el control neuromuscular ja que sembla que esta implicat directament en la taxa de lesions. A partir de l'adolescència, és quan aquesta taxa de lesions incrementa en el sexe femení en comparació amb el masculí (Quatman et al., 2008). S'han observat diferències significatives del control

neuromuscular en els músculs del turmell entre homes i dones (Khowailed & Lee, 2021). Un increment de l'activitat dels músculs isquiotibials i una disminució dels músculs quàdriceps, per un millor control del genoll durant la ovulació, s'ha associat als nivells d'E2 (Khowailed et al., 2015). El to muscular del tibial anterior i el peroné llarg van disminuir significativament durant la fase ovulatòria en comparació amb la menstruació i van anar acompanyats d'un major balanceig també durant aquesta fase, només en les tasques d'equilibri més dificultoses (Khowailed & Lee, 2021). En la mateixa direcció, s'ha observat una disminució del to i la rigidesa muscular durant l'ovulació i correlacions entre febles i fortes entres les propietats mecàniques de la musculatura del turmell i el balanceig postural. Aquests resultats suggereixen que el nivell d'E2 present durant l'ovulació pot incrementar la laxitud articular i influenciar en l'estabilitat postural (Yim et al., 2018).

Altres estudis han intentat relacionar l'augment de la fatiga muscular amb el canvi de les variables electromiogràfiques. Es van estimar velocitats de conducció menors al final de la fase F i al final de la fase L. Aquesta diferència entre les fase del CM va comportar més susceptibilitat a la fatiga muscular al final de la fase L (Soares et al., 2011).

6.2. Risc de lesions

La incidència de les lesions esportives en les dones és quasi 10 vegades superior als homes. Concretament la lesió del lligament encreuat anterior (LEA) en atletes femenines té una incidència entre 4 i 6 vegades més alta, que entre els atletes masculins. En els esports d'hivern s'ha observat com el sexe femení és un factor que incrementa el risc de les lesions esportives i el genoll és la part del cos amb més incidència. Concretament les esquiadores femenines tenen un risc 1,65 vegades major de tenir una lesió del LEA en comparació amb els seus homòlegs homes (Rotllan & Viscor, 2023). Molts estudis s'han focalitzat en les lesions de genoll i la laxitud del LEA (Chidi-Ogbolu & Baar, 2019). Es considera que les propietats de tensió dels lligament i la funció neuromuscular

es pot veure afectada pels E2 i la P4 (**Capítols 5.1.6 i 5.2.6**) (Chandrashekar et al., 2006).

Alguns estudis però, no han observat diferències entre les fases del CM (Burgess et al., 2009, 2010). Les opinions contradictòries mantenen obert el debat sobre l'existència d'una relació causal directa entre les hormones ovàriques i les lesions del LEA, a causa dels canvis en les propietats mecàniques del teixit conjuntiu.

S'ha observat com el risc de lesió incrementa en el període premenstrual (Myklebust et al., 2003). Els efectes del síndrome premenstrual en l'equilibri i la percepció de moviment podria ser determinant i afectar les habilitats motores (Posthuma et al., 1987). Durant la fase ovulatòria, s'han observat menors nivells de rigidesa al genoll associats a un augment de la laxitud d'aquesta articulació (LaStayo et al., 2003). Algunes característiques del rendiment neuromuscular com la força muscular i l'ordre de reclutament poden contribuir a una major taxa de lesions del LEA en les dones (Huston & Wojtys, 1996).

Els programes d'entrenament neuromuscular amb exercicis pliòmètrics, de propioceptius i correcció del valg dinàmic poden disminuir els riscos de lesió (Mehl et al., 2018).

6.3. Resposta cardiovascular

Degut al efectes cardiovasculars de les hormones ovàriques (**Capítol 5.1.1.**) alguns paràmetres fisiològics poden estar afectats al llarg del CM.

En un estudi en dones eumenorreiques on van realitzar dos proves d'esforç, fins a l'esgotament en cicloergòmetre, no van mostrar diferències en la funció cardiorespiratòria, els nivells de lactat o el rendiment, definit coma potència i $\dot{V}O_2$ max. D'altre banda si que es va observar un major impuls ventilatori en la fase L (Smekal et al., 2007). Durant la fase L hi ha un major nombre i duració d'episodis de taquicàrdia supraventricular paroxística, segurament degut a la presència de la P4 que incrementa l'excitabilitat cardíaca (Rosano et al., 1996)

S'ha observat en diferents estudis com la FC i el REP a la mateixa intensitat es veuen augmentats durant la fase L, suggerint un major esforç cardiovascular, tot i així, segurament degut a les adaptacions del sistema cardiovascular a l'exercici no s'ha observat canvis en el rendiment atlètic (Lebrun et al., 2020).

6.4. Resposta a la hipòxia

Una multitud de persones es veuen exposades a l'altitud i en conseqüència a la hipòxia. Aproximadament el 7% de la població mundial, més de 500 milions de persones, viuen per sobre dels 1.500 metres (Tremblay & Ainslie, 2021). A nivell recreatiu i professional, moltes persones practiquen activitats esportives a la muntanya tant a l'estiu com a l'hivern, realitzen entrenaments en altitud o en condicions d'hipòxia (tendes o habitacions a nivell del mar (NM)), viatges aeris, etc. Existeixen diferents tipus d'exposició a la hipòxia en funció de la durada: aguda o crònica i en funció de la freqüència: continua o intermitent (Prabhakar & Semenza, 2012). Les adaptacions a la hipòxia han estat àmpliament estudiades (Basualto-Alarcón et al., 2012), tot i així la majoria d'estudis s'han realitzat en població masculina (Raberin et al., 2024). Una recent revisió ha profunditzat en els múltiples mecanismes subjacents de l'adaptació a l'altitud (respostes respiratòries, hemodinàmiques, metabòliques, musculars i hemodinàmiques) en relació al sexe i la influència de les hormones sexuals femenines (CM i AH) durant l'exercici en altitud.

La majoria del treballs que estudien els efectes del CM en l'altitud s'han centrat en la resposta ventilatòria. La influència de la P4 en els centres respiratoris (**Capítol 5.2.1.**), com a estimulants de la respiració degut a una reducció del llinar del centre respiratori medullar (Barba-Moreno et al., 2022) podria explicar l'augment de la $\dot{V}_E$ durant la fase L (Brutsaert et al., 2002) però no existeix una resposta clara de com el CM afecta el rendiment aeròbic (Woorons et al., 2005).

6.4.1. La hipòxia com a agent estressant.

L'oxigen és una molècula essencial per a la producció d'adenosinatrifosfat (ATP), la principal font d'energia per a les cèl·lules dels mamífers, a partir de l'oxidació de substrats com la glucosa (Berg et al., 2007). En aquest procés, l'oxigen (O_2) actua com a acceptor final d'electrons, un pas clau per generar energia a l'interior de les mitocòndries. Com a éssers essencialment aeròbics, els humans hem desenvolupat sistemes respiratoris i cardiovasculars molt especialitzats per garantir un subministrament adequat d'oxigen als teixits, de manera que es mantingui l'homeòstasi. Aquesta homeòstasi pot veure's alterada per diversos factors, com els ambientals, l'exercici físic o certs trastorns (Ulrich et al., 2017). Entre els factors ambientals, la hipòxia, una condició caracteritzada per una reducció de l'oxigen disponible, és un dels més estressants per al manteniment de l'equilibri homeostàtic. La hipòxia sistèmica es refereix a un entorn amb una disponibilitat reduïda d' O_2 , que pot ser causada per una disminució de la pressió baromètrica (hipòxia hipobàrica) o per una concentració reduïda d' O_2 en l'ambient, la qual cosa condueix a una menor fracció d' O_2 inspirat (F_{IO_2}) (hipòxia normobàrica). En qualsevol dels dos casos, això dona lloc a una pressió parcial d'oxigen inspirat (P_{iO_2}) més baixa que en condicions de normoxia, considerat, a nivell del mar, per sota dels 150 mmHg (Conkin & Wessel, 2008). Com a resultat davant d'aquesta situació, tots els processos involucrats en el transport d'oxigen des de l'atmosfera fins als teixits, coneguts com a la cascada d'oxigen, es veuran afectats, disminuint la PO_2 en cada escaló des de l'exterior fins a l'interior de les mitocòndries (Dominelli et al., 2021).

6.4.2. Hipòxia hipobàrica.

Tenint en compte que l'aire atmosfèric està compost per la suma de diferents gasos, en diferents concentracions (78% de nitrogen, 21% d'oxigen, 0,3% de diòxid de carboni i un 1% de gasos inerts) i que la pressió total d'un conjunt de gasos és la suma de les pressions parcials de cada gas (Llei de Dalton), en funció de l'altitud en la que ens trobem la PO_2 canviarà (Sharma & Hashmi, 2025). Per exemple, a nivell del mar, amb una pressió baromètrica de 760 mmHg (1013 mbar),

la PO_2 de l'aire atmosfèric sec és de 159 mmHg (20,9% O_2). A mesura que s'incrementa l'altitud, la pressió baromètrica disminueix, fet que provoca una reducció de la PO_2 atmosfèrica, per tant podem dir que les condicions de l'ambient són d'hipòxia hipobàrica. Aquesta disminució de la PO_2 comporta dificultats en la difusió d'oxigen a través de les membranes alveolars i, en conseqüència, en la disponibilitat d'oxigen als teixits, provocant hipoxèmia (Moore et al., 1998). A 4.000 metres d'altitud la PO_2 de l'aire atmosfèric és de 97,02 mmHg encara que la seva concentració és la mateixa que a nivell del mar (20,9% O_2) degut a que la pressió baromètrica s'ha reduït a 462 mmHg. Aquestes són les característiques de l'aire atmosfèric, però quan parlem de l'aire en el tracte respiratori, és a dir l'aire inspirat que difondrà als alvèols, s'ha de considerar la pressió del vapor d'aigua que depèn de la temperatura i la humitat relativa. Per tant, degut a que l'aire als pulmons s'escalfa i s'humidifica, la PiO_2 encara serà més baixa (Ortiz-Prado et al., 2019).

6.5. Capacitat aeròbica

En línies generals el $\dot{V}O_2$ max es l'indicador principal de rendiment aeròbic, però no es veu modifica en CM ovulatoris (Dombovy et al., 1987; Smekal et al., 2007). En un estudi on van comparar els perfils hormonals eumenorreic i amenorreic en dos proves d'esforç submàxim, no es van observar diferències significatives entre les fases amb concentracions hormonals similars en cap de les següents variables: FC, REP, temps fins a l'esgotament, $\dot{V}_E$ o el lactat plasmàtic (De Souza et al., 1990). Tampoc es van observar canvis entre les fases del CM en el treball cardiorespiratori (Dombovy et al., 1987; Rael et al., 2021). D'altra banda, s'han observat augments de la $\dot{V}_E$ (Janse de Jonge, 2003; Samsudeen & Rajagopalan, 2016; Williams & Krahenbuhl, 1997), de la FC i el consum d'oxigen ($\dot{V}O_2$) durant exercici màxim i submàxim (Jurkowski et al., 1981; Schoene et al., 1981).

Tot i així, s'ha observat com al augmentar la càrrega de treball, el lactat plasmàtic i la producció de diòxid de carboni són més baixos en la fase L versus la F, mentre que el $\dot{V}O_2$ max era major (Redman et al., 2003).

Encara que el rendiment sembla que en línies generals no es veu afectat entre les fases del CM, hi ha una tendència durant la fase L, de major dependència dels greixos com a substrat metabòlic i també un increment de les reserves de glucogen.

HIPÒTESIS I OBJECTIUS

Hipòtesis

- El to i la rigidesa musculars es veuen incrementats i l'elasticitat es veu disminuïda immediatament després d'una cursa ciclista i al llarg d'una setmana de competició ciclista professional en participants femenines.
- La fase lútea mitja del cicle menstrual eumenorreic incrementa el rendiment aeròbic en comparació amb la fase folicular en dones entrenades amb un perfil eumenorreic.
- El rendiment esportiu es manté estable al llarg de les fases activa i no activa d'un cicle hormonal regulat per l'administració d'anticonceptius.

Objectiu principal

La present tesi doctoral s'ha centrat principalment en examinar els efectes del sexe femení i de les hormones femenines en la resposta fisiològica en diferents sistemes i el seu impacte en el rendiment esportiu.

Objectius específics

- Avaluar la resposta muscular de paràmetres mecànics específics (to muscular, rigidesa i flexibilitat) d'atletes femenines professionals al llarg d'una setmana de competició ciclista (**SECCIÓ I**).
- Avaluar els efectes del cicle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica en dones entrenades sense prèvia aclimatació a l'altitud (**SECCIÓ II**):
 - Comparar les respostes cardiorespiratòries entre la fase fol·licular i la fase lúcia mitja en participants amb un perfil hormonal eumenorreic, en una prova submàxima a 4000m d'altitud simulada en cambra hipobàrica.
 - Determinar els efectes de la hipòxia hipobàrica aguda en el control postural i comparar-lo entre les fases del cicle menstrual fol·licular i la lúcia mitja en participants amb un perfil hormonal eumenorreic.
- Avaluar els efectes dels anticonceptius hormonaus en el rendiment esportiu aeròbic-anaeròbic (**SECCIÓ III**):
 - Comparar la potència anaeròbica i el rendiment aeròbic entre la fase activa i no activa d'un cicle hormonal induït per anticonceptius.

MATERIAL I MÈTODES

1. SECCIÓ I: Resposta muscular en una cursa ciclista femenina

1.1. Participants

En aquest estudi va participar un grup de sis ciclistes professionals (n=6) d'un dels equips de la unió ciclista internacional (UCI) *World Tour*, la màxima categoria femenina internacional. Els criteris d'inclusió van ser formar part d'un dels equips participants a la competició i tenir almenys un any d'experiència en el ciclisme. Els criteris d'exclusió van ser acabar la competició amb algun tipus de molèstia muscular o articular i tenir alguna lesió o dolència muscular abans de la competició. A la **Taula 6** es mostren les mesures antropomètriques i els anys d'experiència en ciclisme. Cap de les participants prenia anticonceptius hormonals. Degut a la mostra reduïda per cada fase del CM; la menstruació (n=2, la F (n=2) i la L (n=2), no es van tenir en compte els seus efectes en l'anàlisi estadístic. L'estudi es va dissenyar seguint les normes del Comitè de Bioètica de la Universitat de Barcelona i d'acord amb els principis de la Declaració de Hèlsinki de 1975, revisada el 2008.

Taula 6. Característiques antropomètriques i experiència competitiva.

Variables	Mean $\pm$ SD (n=6)	Min-max
Age, years	25,0 $\pm$ 5,6	19,0-35,0
Weight, kg	57,7 $\pm$ 5,1	51,0-64,0
Height, cm	166,8 $\pm$ 4,0	159,0-170,0
BMI	20,7 $\pm$ 1,7	17,9-22,2
Competition experience	8,9 $\pm$ 9,8	1,5-28,0

SD: standard deviation, BMI: body mass index.

1.2. Propietats musculars no invasives

El MyotonPRO® (Myoton Ltd., Estònia) es va utilitzar per avaluar el to muscular, l'elasticitat muscular i la rigidesa. El MyotonPRO® és un dispositiu no invasiu, portàtil, fàcil d'utilitzar i relativament econòmic, que s'utilitza per a la

prevenció, la detecció del risc de lesions i el seguiment en els processos de rehabilitació. Aquestes característiques permeten que es pugui utilitzar en molts entorns, incloent-hi les competicions i ambients fora d'un laboratori (Aird et al., 2012; Mooney et al., 2013).

El dispositiu es va configurar amb una càrrega prèvia de 0,18 N. A la **Figura 13** es pot observar la col·locació del dispositiu, perpendicular al ventre del múscul a avaluar, realitzant una precompressió del teixit subcutani. El dispositiu va emetre un impuls mecànic breu (15 ms) de baixa intensitat (0,4 N) seguit d'un descans ràpid i una alliberament de la força aplicada (Gervasi et al., 2017). Aquest impuls causa una deformació elàstica en el teixit muscular que genera unes oscil·lacions que són enregistrades i emmagatzemades pel dispositiu.

Durant la prova, es van obtenir simultàniament els següents paràmetres:

- **Freqüència de l'oscil·lació (Hz)**: indica el to muscular o la tensió intrínseca del múscul.
- **Rigidesa muscular (N/m)**: és la capacitat del múscul per resistir una força externa o la seva contracció, que modifica la seva forma (Viir et al., 2006).
- **Decrement logarítmic (log D)**: descriu l'elasticitat muscular, és a dir, la capacitat de recuperar la seva forma després de ser deformada o després de la seva contracció (Mooney et al., 2013).



Figura 13. Tècnica de l'exploració amb el MyotonPRO®. A) Identificació de la posició de mesura a través d'una contracció isomètrica. B) Marcant el punt de mesura amb un retolador permanent. C) Mesura amb el dispositiu MyotonPRO®.

1.3. Disseny de l'estudi

Les participants van competir en 3 curses ciclistes en una mateixa setmana: La Volta a Navarra (2 etapes amb un dia de descans intercalat entremig d'ambdues) i la cursa *Donostiako Klasikoa* (1 etapa) amb un dia de descans entre les dues competicions. La primera cursa de la Volta a Navarra va tenir una longitud de 108 km de distància amb un desnivell acumulat de 2.297 m i la segona cursa va ser de 120,7 km de distància i 1.321 m de desnivell acumulat. Finalment, la cursa *Donostiako Klasikoa* va ser de 126,7 km de distància i 2.693,3 m de desnivell acumulat.

La **Taula 7** mostra el disseny de l'estudi que va consistir en unes mesures repetides. El disseny es va dividir entre la fase de familiarització, mesures abans i després de totes les competicions i avaluacions basals des del primer fins al cinquè dia de la setmana de competicions.

La fase de familiarització es va realitzar en la primera competició de les tres etapes en què les ciclistes van participar al llarg de 5 dies consecutius i va permetre avaluar les característiques intrínseques de la participació en una cursa de ciclisme de categoria professional (lloc i entorn on es van fer les mesures, el temps necessari per realitzar-les, i el temps de trasllat des del punt de sortida fins al punt d'arribada de la cursa) i observar els possibles esdeveniments inesperats o aspectes fora del nostre control (clima, incidents de trànsit o tancaments de carreteres). Els dos dies següents de competició, que vam anomenar competició 1 (C1) i competició 2 (C2), es van prendre mesures d'anàlisi, un màxim de 40 minuts, abans i després de les curses.

Taula 7. Disseny de l'estudi

FP	R1	C1	R2	C2
Basal	Basal	Basal	Basal	Basal
Pre		Pre		Pre
Post		Post		Post

FP: familiarization phase, R1: rest day 1, R2: rest day 2, C1: competition 1, C2: competition 2.

1.3.1. Mesures de les propietats musculars

Els músculs estudiats van ser els següents: *vastus lateralis* (VL), *vastus medialis* (VM), *rectus femoris* (RF), *biceps femoris* (BF), *lateral gastrocnemius* (LG) i *medial gastrocnemius* (MG) de l'extremitat inferior dominant de les ciclistes. Vam identificar l'extremitat dominant amb una qüestió que s'ha reportat precisa anteriorment en esports simètrics: "Si haguessis de llançar la pilota contra un objectiu, quina cama utilitzaries per llançar la pilota?" (van Melick et al., 2017).

La **Figura 13** mostra com es van prendre les mostres amb les ciclistes estirades a la llitera en posició supina per als músculs VL, VM i RF. En posició prona per als músculs BF, LG i MG. Per tal de mantenir la postura de l'extremitat en una posició neutral, es van utilitzar tovalloles enrotllades a cada costat del malleol tibial i a la part externa del membre a estudiar, en decúbit supí i en decúbit prona amb el peu fora de la llitera. En la primera avaluació de la setmana, els punts de mesura es van marcar amb un retolador permanent. Els músculs a estudiar es van posicionar

prèviament sol·licitant una contracció isomètrica, i els punts d'avaluació es van seleccionar seguint les recomanacions de SENIAM (Bravo-Sánchez et al., 2021; Gavronski et al., 2007; Hermens et al., 2000). A més, es van realitzar avaluacions basals durant 5 dies, abans de l'esmorzar.

La **Taula 8** mostra les mitjanes i els valors màxims de la FC i de les potències en watts (W) per a les 3 curses de ciclisme. Aquests valors indiquen que els subjectes van realitzar un exercici d'alta intensitat i que són atletes d'elit.

Taula 8. Paràmetres de la intensitat de l'exercici

Parameters	FP (108 km)	C1 (120,7 km)	C2 (126,7 km)
HR (bpm)	167	159	168
HR max (bpm)	194	193	192
Power output (W)	185	157	183
Power output max W)	731	696	637

HR: heart rate, bpm: beat per minute, W: watts, FP: familiarization phase, C1: competition 1, C2: competition 2

1.4. Anàlisi estadística

El programa estadístic de codi obert JASP 0.10.2 es va utilitzar per a l'anàlisi estadística. Es va realitzar una anàlisi descriptiva de les variacions en el to muscular, la rigidesa muscular i l'elasticitat. Es van calcular els valors de les mitjanes i les desviacions estàndard per als resultats que tenien una distribució normal. Per a les dades que mostraven una desviació de la normalitat, es va considerar la mediana. La prova de Shapiro–Wilk es va escollir per observar si es complien els criteris de normalitat ($p < 0.05$).

Es van dur a terme la prova t de Student i la prova de Wilcoxon per comparar les situacions pre i post competició (C1 i C2) i les situacions basals entre el primer i el cinquè dia, en els sis músculs estudiats (VL, VM, RF, BF, LG i MG). Els paràmetres inclouen les variables dependents (to muscular, rigidesa i elasticitat), i els factors de subjecte van ser els sis músculs de les sis ciclistes. Es van trobar mides de l'efecte grans en el to muscular i la rigidesa muscular en les situacions pre i post C1 i C2, així com de l'elasticitat en la situació basal. Mentre que es van observar efectes

negligibles en el to muscular i la rigidesa muscular en la situació basal. Les mides de l'efecte es van proporcionar mitjançant el càlcul de la correlació de rang-biserial (Rank-Biserial Correlation r_B).

2. SECCIÓ II: Efectes del cicle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica

A continuació, es presenta la metodologia emprada per avaluar els efectes del CM en el rendiment aeròbic. Un dels principals punts forts d'aquest estudi és l'ús de mètodes directes per detectar l'augment de la LH, fet que va permetre identificar de manera objectiva el moment de l'ovulació i, per tant, determinar amb precisió les diferents fases del CM. Això ens va permetre evitar suposicions o estimacions sobre les fases del cicle, incrementant així la validesa dels resultats obtinguts.

2.1. Participants

Un total de 20 dones eumenorreiques (n=20), amb edats compreses entre els 18 i els 49 anys, van ser incloses en aquest estudi (**Taula 9**). Per ser elegibles per a la participació, les dones havien de tenir un cicle menstrual regular (de 21 a 36 dies de durada, sense irregularitats menstruals) i havien d'haver deixat d'utilitzar tractaments anticonceptius hormonals almenys tres mesos abans de la seva inclusió. A més, totes les participants havien de gaudir de bona salut i realitzar un mínim de 150 minuts d'exercici aeròbic/setmana. Abans de la seva participació en l'estudi, totes les participants van ser informades sobre les proves incloses en el protocol i van haver de signar un formulari de consentiment informat per escrit. L'estudi es va dur a terme d'acord amb la Declaració de Helsinki per a l'experimentació humana i va ser aprovat pel Comitè Ètic Institucional de la Universitat de Barcelona (IRB 00003099; CER022441).

Taula 9. Característiques antropomètriques

	Mean $\pm$ SD	Range
Age (years)	33,95 $\pm$ 9,11	18 - 47
Body weight (Kg)	56,48 $\pm$ 5,21	48 - 67
Height (cm)	166,4 $\pm$ 5,87	157 - 178
BMI	20,41 $\pm$ 1,71	17,86 - 23,33

BMI: Body mass index, SD: Standard deviation

2.2. Determinació del cicle menstrual

Per determinar les fases del CM durant l'estudi, les participants van registrar les seves menstruacions a l'aplicació FitrWoman (FitrWoman Ltd., n.d.) i es van realitzar determinacions en orina de l'hormona luteïnitzant (LH) i per tal de situar l'ovulació en el CM. Van fer els tests diàriament des del dia 7 del CM fins que es va obtenir un resultat positiu. Aquest és el mètode menys invasiu i menys costós per tal d'obtenir una mesura hormonal directe al llarg del CM, concretament detecta l'augment de la LH, que ocorre abans de l'ovulació (Janse De Jonge et al., 2019). Els tests d'orina es van realitzar al matí amb la primera mostra d'orina o en alguns casos, al migdia, aproximadament tres o quatre hores després de l'última mostra d'orina. Se'ls va demanar a les participants que enviessin una fotografia del resultat de la prova diàriament a un dels investigadors.

Les fases del CM es van determinar en funció de les dades del cicle proporcionades. Les fases del CM estudiades van ser la fase 1, la fase F primerenca, que correspon als primers cinc dies de menstruació, i la fase 4, definida com la fase L mitja, que ocorre entre els dies 7 i 9 després d'obtenir un resultat positiu de la prova d'ovulació. No obstant això, la determinació de les fases del CM d'aquesta manera té algunes limitacions, ja que no vam realitzar cap anàlisis en sèrum i per tant no vam saber els nivells les hormones ovàriques (E2 i P4) (Elliott-Sale et al., 2021). Les característiques del CM es mostren a la **Taula 10**.

Taula 10. Característiques del cicle menstrual

Menstrual cycle phases	Mean $\pm$ SD	Minim	Maxim
Follicular phase length (nº days)	14,43 $\pm$ 3,05	9	18
Luteal Phase length (nº days)	14,3 $\pm$ 3,66	9	26
Ovulation day	14 $\pm$ 2,12	9	17

SD: Standard deviation

2.3. Hipòxia hipobàrica aguda

Es van realitzar espirometries, proves d'equilibri corporal i proves submàximes d'exercici en les dues fases del CM a estudiar en una cambra hipobàrica (Moelco Técnicas Aplicadas SL; Terrassa, Espanya) descomprimida fins a la pressió baromètrica equivalent a una altitud de 4.000 m (616 hPa). Totes les exposicions a hipòxia hipobàrica es van completar en un període d'entre 40 a 90 minuts, segons el nombre de participants avaluats en el mateix assaig d'exposició dins la cambra hipobàrica.

2.4. Disseny de l'estudi

Les participants van ser derivades al Servei d'Hipobària i Fisiologia Biomèdica de la Universitat de Barcelona. Les mesures es van realitzar sota condicions normobàriques a nivell del mar (SL) i a una altitud simulada equivalent a 4.000 m a la cambra hipobàrica (HH). El protocol experimental es va repetir dues vegades en les dues fases del cicle menstrual a avaluar (F i L). La primera visita es va realitzar en una fase del cicle menstrual seleccionada aleatòriament, i es va registrar el pes corporal i alçada de les participants. El disseny de l'estudi es mostra a la **Figura 14**.

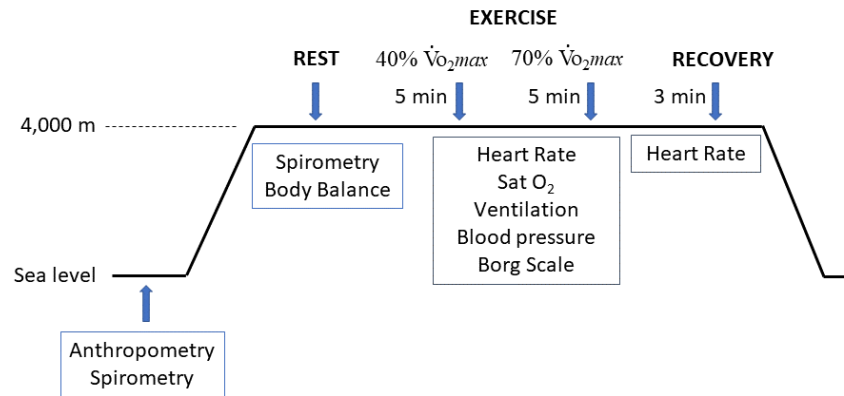


Figura 14. Disseny de l'estudi.

2.4.1. Exercici submàxim

El protocol d'exercici es va realitzar en bicicleta (Bike ERG, Concept2®; Morrisville, EUA) en condicions de HH, començant amb un escalfament de 3 minuts (< 40% del $\dot{V}O_{2max}$ teòric), seguit de dos períodes de 5 minuts d'intensitat baixa (40% del $\dot{V}O_{2max}$ teòric) i alta intensitat (70% del $\dot{V}O_{2max}$ teòric). Les intensitats es van calcular utilitzant la taula d'Åstrand. Immediatament després de l'exercici, les participants van deixar de pedalejar i van descansar 3 minuts sobre el cicloergòmetre.

2.4.2. Espirometria

La funció pulmonar es va avaluar primer en condicions a nivell del mar (SL) i després sota HH en condicions de repòs utilitzant un espiròmetre (Easy-on PC; nnd Medical Technologies; Zuric, Suïssa) i el seu programari associat (Connect V03.09.05.19; nnd Medical Technologies; Zuric, Suïssa). Aquest equipament es basa en tecnologia ultrasònica sense contacte (TrueFlow™), que no requereix calibratge i és independent de les variables ambientals (humitat, temperatura, pressió i canvis en la composició (massa molar) de l'aire). Les participants, assegudes en una cadira, van realitzar un mínim de tres maniobres estàndard vàlides per comprovar la repetibilitat de la prova. La funció automàtica de control de qualitat permet seleccionar les dades enregistrades de grau A (òptimes). Es van registrar les següents variables ventilatòries: *forced vital capacity* (FVC), *forced*

expiratory volume in the first second (FEV1), forced expiratory volume in the first second/forced vital capacity ratio (FEV1/FVC), forced expiratory flow between 25% and 75% of forced vital capacity (FEF25-75), forced inspiratory volume capacity (FIVC), forced expiratory time (FET), peak expiratory flow (PEF) i peak inspiratory flow (PIF). A més, es van mesurar el volum corrent (VC), la *respiratory frequency* (Rf) i la ventilació pulmonar ($\dot{V}_E$) sota HH durant l'últim minut de cada intensitat d'exercici.

2.4.3. Saturació d'oxigen, freqüència cardíaca i taxa d'esforç percebut

La saturació d'oxigen (SaO_2) es va monitoritzar mitjançant un pulsioxímetre (Nonin Onyx II 9550) col·locat a l'índex de la mà dreta. La FC es va obtenir mitjançant un sensor de corretja toràcica (HRM-Dual, Garmin Ltd; Kansas, EUA). El rang d'esforç percebut (REP) es va demanar segons l'escala de Borg (Borg, 1970). Aquests paràmetres es van registrar durant l'últim minut de cada intensitat d'exercici sota HH.

2.4.4. Pressió sanguínia i freqüència cardíaca de repòs

La PS es va quantificar mitjançant un tensiòmetre (Omron M3) al final del protocol d'exercici, i la FC es va registrar a 1, 2 i 3 minuts després d'aturar l'exercici, mentre les participants descansaven en silenci sobre el cicloergòmetre.

2.4.5. Paràmetres de pressió plantar

El control de l'equilibri corporal es va avaluar sota HH en dues condicions, començant amb els ulls oberts (UO) i seguit amb els ulls tancats (UT) mitjançant una plataforma de pressió plantar (Podoprint, Namrøl Medical S.L.; Barcelona, Espanya). Es va instruir a les participants perquè descansessin sobre la plataforma descalces amb una postura relaxada i estable. En la condició UO, havien de centrar la mirada en un punt situat a 3 m de distància i a 1,70 m d'altura, després, es va repetir amb UT. Les participants van mantenir ambdues posicions durant un minut i van descansar un minut entre elles. Es van avaluar deu paràmetres posturals segons la variació enregistrada en la posició del centre de pressió (CoP); longitud total de la trajectòria, superfície del trajecte, relació longitud/superfície, velocitat mitjana del CoP, velocitat lateral, velocitat anterior, variació lateral, variació anterior, desplaçament en l'eix x i desplaçament en l'eix y.

2.4.6. Síntomes al llarg del cicle menstrual

El CVM-22 és un qüestionari d'autoavaluació validat en llengua espanyola, que avalua la qualitat de la vida menstrual. Consta de 19 preguntes distribuïdes en tres categories: percepció de la salut i benestar físic i funcional; síntomes; i benestar psicològic i cognitiu. El CVM-22 utilitza una escala Likert per determinar la freqüència de cada síntoma. Un valor de tres punts indica que el síntoma no es va “experimentar mai”, dos punts indica “algunes vegades”, un punt indica “sovint” i zero punts indica “sempre”. Com més alt sigui la puntuació (sobre 66), millor serà la qualitat de vida menstrual (Torres-Pascual et al., 2019). A més, es va crear una enquesta en línia mitjançant Google Forms per avaluar els síntomes durant el CM i el seu impacte negatiu en l'entrenament i les competicions.

2.5. Anàlisi estadística

Primerament, es va comprovar la distribució de les dades amb la prova de Shapiro-Wilk. Les respostes cardiorespiratòries i els paràmetres posturals es van comparar mitjançant ANOVA de mesures repetides de dos factors, entre les fases del CM i l'altitud (SL/HH), la intensitat de l'exercici (baixa/alta) o la condició dels ulls (obert/tancat). Quan no es va trobar una distribució normal, es van realitzar les proves de Friedman i Kruskal-Wallis. Per a les comparacions múltiples, es van fer anàlisis post-hoc segons les proves de Tukey i Bonferroni. La comparació entre les fases del CM es va fer amb la prova t aparellada i la prova de Wilcoxon. Per avaluar la influència de l'edat o el tipus d'esport es va utilitzar una prova de Pearson. Es van considerar diferències significatives quan $p \leq 0,05$. L'anàlisi estadística es va realitzar utilitzant R (Versió 4.4.1).

3. SECCIÓ III: Efectes dels anticonceptius hormonals en el rendiment aeròbic-anaeròbic

A continuació es mostra la metodologia utilitzada per a l'estudi en desenvolupament, basat en una mostra provisional composta per 5 participants. Aquesta mostra inicial ens ha permès obtenir dades preliminars i han estat analitzades i presentades per tal d'avaluar la viabilitat dels procediments i la pertinència dels instruments utilitzats.

3.1. Participants

Les participants van ser una població específica de dones majors de 18 anys que competien com a atletes d'elit en la disciplina de rem i que estaven afiliades a la federació corresponent. Aquestes dones es trobaven en edat reproductiva i utilitzaven AH. Concretament, les participants feien servir AO o l'anell vaginal. Les característiques antropomètriques de les participants es poden consultar a la **Taula 11**. Per tal de garantir la protecció i els drets de les participants, l'estudi va complir amb els principis ètics de la Declaració d'Hèlsinki, així com amb la normativa nacional i autonòmica. El Comitè Ètic d'Investigació Clínica de l'Administració Esportiva de Catalunya va certificar el present projecte. Abans de començar la recollida de dades, totes les participants van ser informades detalladament sobre els objectius, els procediments i els possibles riscos associats a la seva participació i van signar el consentiment informat. Els criteris d'inclusió van ser l'ús de qualsevol tipus d'AH durant un període mínim de tres mesos i els criteris d'exclusió van descartar les participants que utilitzaven mètodes anticonceptius no hormonals o tenien CM.

Taula 11. Característiques antropomètriques.

Paràmetres	Mitjana (DE)
Edat (anys)	24,0 (4,3)
Pes (kg)	67,6 (6,0)
Altura (m)	1,7 (0,1)
IMC (kg/m ²)	22,9 (1,2)

DE: desviació estàndard, IMC: índex massa corporal.

3.2. Determinació del perfil hormonal

El perfil hormonal de les participants (n=5) es va avaluar en funció de l'ús AH, es va preguntar la marca registrada de l'anticonceptiu per així saber les concentracions hormonals corresponents (**Taula 12**). Les participants van registrar la informació en relació a l'ús dels AH a l'aplicació FitrWoman (FitrWoman Ltd., n.d.) i a la que els investigadors vam tenir accés. Les fases del perfil hormonal que es van estudiar van ser la FAH, en la que les participants es van administrar una combinació d'estrògens i progestines, fet que va mantenir els nivells hormonals de manera estable i la FNAH, període en el que no es van administrar hormones a les participants, la qual cosa va resultar en nivells baixos d'hormones exògenes a l'organisme (Elliott-Sale et al., 2021).

Taula 12. Tipus d'anticonceptius hormonal.

Tipus d'AH i marca	n	Estrògen (µg)	Progestina (µg)	Presentació
Sibilla (Budapest, Hungría)	2	Etinilestradiol 30	Dienogest 2000	28 comprimits (21 + 7)
Cinfa (Pamplona, España)	1	Etinilestradiol 20	Drospirenona 3000	21 comprimits
Zoely (Haarlem, Païses Baixos)	1	Estradiol 1500	Acetat de Nomegestrol 2500	28 comprimits (24 + 4)
Ornibel (Guadalajara, España)	1	Etinilestradiol 15	Etonogestrel 120	21-7

AH: anticonceptiu hormonal

3.3. Disseny d'estudi

Amb l'objectiu de valorar el rendiment físic de les participants, es va realitzar una prova submàxima de 2.000 metres en el remergòmetre *Ergo Concept 2* (Concept 2, Morrisville, EUA). L'objectiu d'aquesta prova era avaluar diversos paràmetres fisiològics que proporcionessin informació sobre la capacitat aeròbica i l'esforç cardiovascular, així com la potència i eficiència en el rem, en condicions controlades (Turnes et al., 2020).

3.3.1. Test submàxim

El protocol de la prova submàxima en va realitzar en un remergòmetre *Ergo Concept 2*, la distància a cobrir van ser de 2.000 metres, amb una durada aproximada de 7 minuts i una intensitat constant, mantenint un ritme de 28 remades per minut. Atès que les participants utilitzaven habitualment el remergòmetre en els seus entrenaments, ja estaven familiaritzades amb l'equip. Les proves submàximes es van realitzar al Centre Especialitzat de Tecnificació Esportiva de Rem de Banyoles (Girona) i al Centro Especializado de Alto Rendimiento de Remo y Piragüismo y Residencia de Deportistas de Sevilla i va ser supervisades pel seu *staff* tècnic. La recollida de dades es va dur a terme en les dos fases del seu perfil hormonal, durant la FAH, entre els dies 12 i 19 del cicle i durant la FNAH, entre els dies 1 i 7 del cicle (Elliott-Sale et al., 2020).

3.3.2. Lactat

Es va recollir una mostra de sang capil·lar del lòbul de l'orella o del dit mitjançant un lactòmetre portàtil, tant abans de començar la prova com un minut després de finalitzar-la. El dispositiu emprat per a la mesura va ser el Lactate Scout +Plus (Scout +Plus, Cardiff, Regne Unit).

3.3.3. Freqüència Cardíaca

La FC es va registrar de manera contínua durant tota la prova. Cal destacar que no es va utilitzar un dispositiu estandarditzat, sinó que es van emprar els diferents monitors de FC individuals de les esportistes.

3.3.4. Potència

La potència generada durant l'exercici de rem, s'expressa directament en watts (W), reflectint la capacitat de treball per unitat de temps de la participant. El dispositiu emprat per realitzar aquesta mesura va ser el remergòmetre *Ergo Concept 2*, el qual calcula i enregistra la potència mitjana generada al llarg del test de 2.000 metres.

3.4. Anàlisi estadística

El programa R es va utilitzar per fer l'anàlisi estadística. Les variables es van descriure mitjançant mesures de tendència central i dispersió, i la normalitat es va avaluar amb la prova de Shapiro-Wilk on un valor de $p > 0,05$ indicava normalitat. La comparació entre les fases dels cicles induïts per AH es va realitzar amb la prova t de Student, calculant-se la diferència de mitjanes amb un interval de confiança del 95%. Es van aplicar models lineals mixtos per analitzar els efectes de les fases del cicle, incloent-hi efectes aleatoris per tenir en compte la variabilitat entre subjectes i la dependència de les observacions repetides. Aquesta aproximació va permetre obtenir estimacions més precises dels efectes i va reforçar la validesa de l'anàlisi. En aquest estudi, amb una mida mostral de $n = 5$, es va utilitzar el valor d de Cohen per quantificar la magnitud dels efectes, considerant $d \approx 0,2$ com a petit, $d \approx 0,5$ com a mitjà, i $d \approx 0,8$ com a gran.

RESULTATS

1. SECCIÓ I: Resposta muscular en una cursa ciclista femenina

Els resultats que es mostren continuació expliquen com es van modificar les propietats musculars; el to muscular, la rigidesa i l'elasticitat després de la competició ciclista i al llarg de tota una setmana, en la qual van competir tres dies, un grup de dones amb un perfil hormonal de cicles menstruals naturals.

1.1. Propietats musculars abans i després de les competicions

Les nostres dades mostren com el to i la rigidesa disminueixen de manera significativa ($p < 0,001$) després de les dues competicions i l'elasticitat muscular millora un cop finalitzades les competicions ($p < 0,001$). Val a dir que hi ha una tendència, encara que no sempre significativa, de disminució del to muscular en tots els músculs després de la competició. Pel que fa a la rigidesa muscular els resultats van mostrar que tots els músculs avaluats van disminuir de manera independent i significativa un cop acabades les competicions. L'elasticitat va tendir a millorar, disminuint els seus valors logarítmics després de la competició (**Figura 15**).

El múscul VL va ser l'únic que va experimentar canvis significatius en les tres variables a estudiar. El seu to va disminuir significativament després de la competició en comparació amb abans de la competició, en la C1 (15,43 pre-competició versus 14,57 post-competició, $p = 0,031$), i en la C2 (14,78 pre-competició versus 14,10 post-competició, $p = 0,043$). La rigidesa muscular del VL també va disminuir significativament en la C1 ($p = 0,009$), passant de valors inicials de $275,50 \pm 22,13$ a valors finals de $255,90 \pm 20,27$, i el valor logarítmic es va reduir en la C1, la qual cosa indica que el VL va millorar la seva elasticitat ($p = 0,023$).

El RF va ser l'únic múscul que va millorar la seva elasticitat inicial una vegada finalitzades les dues curses. A l'inici de la C1 tenia una rigidesa de $1,40 \pm$

0,25 i al final d'aquesta de $1,21 \pm 0,15$ ($p = 0,015$). També va millorar en la C2 ($1,35 \pm 0,18$ pre-competició versus $1,18 \pm 0,19$ post-competició, $p = 0,010$) representant una millora del 15%.

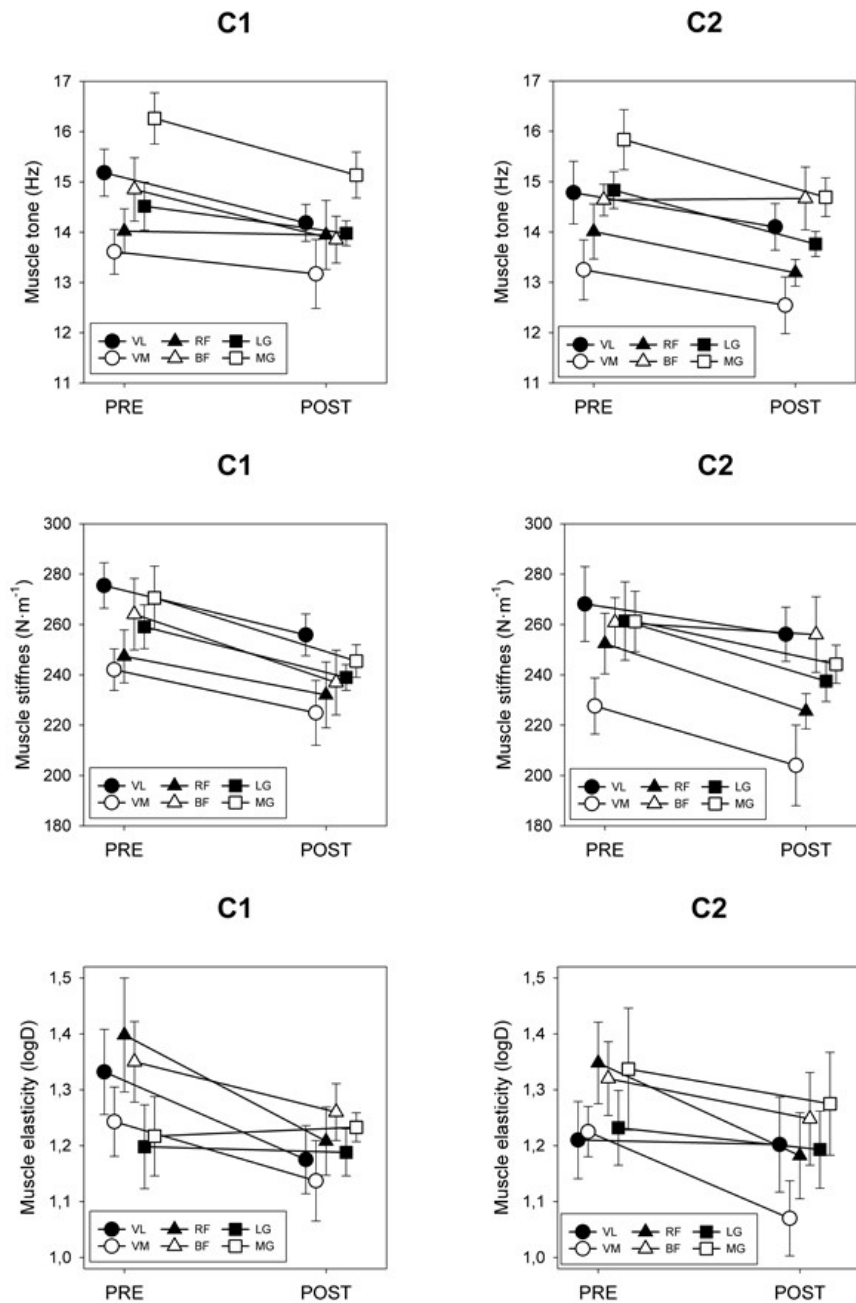


Figura 15. Canvis en les propietats musculars abans i després de les competicions. VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis, RF: rectus femoris, BF: biceps femoris, LG: lateral gastrocnemius, MG: medial gastrocnemius.

Els altres músculs, MG, LG, BF i VM, també van experimentar modificacions significatives en els paràmetres estudiats després de les competicions, seguint la mateixa tendència general (**Taula 13**).

Taula 13. To muscular, resistència i elasticitat abans després de les competicions.

	C1		C2	
	PRE	POST	PRE	POST
VL				
Tone (Hz)	15,43 [13,57 - 16,45]	14,57 [12,84 - 15,07] *	14,78 ± 1,52	14,10 ± 1,14 *
Stiffness (N/m)	275,50 ± 22,13	255,90 ± 20,27 *	268,17 ± 36,44	256,13 ± 26,34
Elasticity (log D)	1,33 ± 0,18	1,18 ± 0,15 *	1,21 ± 0,17	1,20 ± 0,21
VM				
Tone (Hz)	13,61 ± 1,09	13,17 ± 1,68	13,25 ± 1,46	12,54 ± 1,38 *
Stiffness (N/m)	242,07 ± 20,29	224,90 ± 31,53	223,10 [191,40 – 274,40]	200,40 [144,60 – 261,20]
Elasticity (log D)	1,24 ± 0,15	1,14 ± 0,18	1,17 [1,14 – 1,41]	1,05 [0,84 – 1,29] *
RF				
Tone (Hz)	14,02 ± 1,11	13,95 ± 1,58	14,01 ± 1,34	13,19 ± 0,65
Stiffness (N/m)	247,37 ± 25,72	232,00 ± 32,11	252,43 ± 29,50	225,53 ± 17,13 *
Elasticity (log D)	1,40 ± 0,25	1,21 ± 0,15 *	1,35 ± 0,18	1,18 ± 0,19 *
BF				
Tone (Hz)	14,85 ± 1,54	13,85 ± 1,14	14,64 ± 0,77	14,67 ± 1,53
Stiffness (N/m)	264,13 ± 34,74	236,97 ± 31,57 *	260,83 ± 24,25	256,03 ± 36,76
Elasticity (log D)	1,35 ± 0,18	1,26 ± 0,13	1,32 ± 0,16	1,25 ± 0,20
LG				
Tone (Hz)	14,52 ± 1,17	13,98 ± 0,61	14,83 ± 0,90	13,76 ± 0,62 *
Stiffness (N/m)	259,10 ± 21,33	239,00 ± 12,61 *	261,40 ± 38,20	237,53 ± 20,01
Elasticity (log D)	1,20 ± 0,18	1,19 ± 0,10	1,23 ± 0,16	1,19 ± 0,17
MG				
Tone (Hz)	16,26 ± 1,24	15,14 ± 1,12 *	15,84 ± 1,46	14,69 ± 0,94
Stiffness (N/m)	270,60 ± 15,88	245,50 ± 15,88 *	261,23 ± 29,47	244,23 ± 18,62
Elasticity (log D)	1,23 ± 0,06	1,23 ± 0,06	1,34 ± 0,27	1,28 ± 0,22

Les dades s'expressen com a mitjana ± desviació estàndard, excepte en els casos en què la prova de Shapiro-Wilk no ha demostrat una distribució normal de les dades. En aquests casos, es presenten la mediana i els rangs. * $p \leq 0.05$. VL: *vastus lateralis*, VM: *vastus medialis*, RF: *rectus femoris*, BF: *biceps femoris*, LG: *lateral gastrocnemius*, MG: *medial gastrocnemius*, C1: competició 1, C2: competició 2.

1.2. Propietats musculars basals

Les mesures de les propietats musculars es van realitzar durant els 5 dies de concentració competitiva, abans de l'esmorzar, i els valors del dia 1 es van

comparar amb els del dia 5 (**Taula 14**). Els resultats van mostrar que el to muscular durant la setmana de competició presenta tendències individuals segons els músculs i amb diverses oscil·lacions al llarg de la setmana, en funció de si era un dia de competició o de descans. No obstant això, no es van trobar resultats significatius en cap múscul quan es van comparar els valors del primer dia amb els del cinquè.

Taula 14. To muscular, resistència i elasticitat durant els 5 dies de competicions.

	FP	R1	C1	R2	C2
VL					
Tone (Hz)	14,84 ± 1,38	14,46 ± 0,80	14,86 ± 1,35	14,46 ± 1,11	15,06 ± 1,12
Stiffness (N/m)	272,97 ± 21,84	265,80 ± 15,19	275,13 ± 25,21	263,40 ± 27,76	272,47 ± 27,90
Elasticity (log D)	1,47 ± 0,20	1,40 ± 0,17	1,42 ± 0,24	1,34 ± 0,19	1,19 ± 0,20 *
VM					
Tone (Hz)	13,68 ± 1,36	13,34 ± 1,03	13,54 ± 1,17	13,42 ± 1,11	13,16 ± 0,91
Stiffness (N/m)	234,20 ± 25,23	239,90 ± 23,13	241,80 ± 22,22	235,27 ± 17,93	234,27 ± 20,06
Elasticity (log D)	1,35 ± 0,12	1,39 ± 0,20	1,38 ± 0,16	1,36 ± 0,15	1,29 ± 0,20
RF					
Tone (Hz)	14,07 ± 1,34	13,99 ± 1,11	13,86 ± 0,94	13,92 ± 1,09	14,12 ± 0,97
Stiffness (N/m)	242,97 ± 27,47	242,87 ± 24,42	247,27 ± 17,99	245,50 ± 14,84	262,13 ± 23,11 *
Elasticity (log D)	1,43 ± 0,18	1,42 ± 0,15	1,49 ± 0,17	1,44 ± 0,16	1,51 ± 0,26
BF					
Tone (Hz)	14,30 ± 0,98	14,18 ± 1,19	14,02 ± 0,88	14,17 ± 1,10	13,98 ± 0,90
Stiffness (N/m)	248,30 ± 22,16	249,77 ± 31,92	250,00 ± 22,20	246,03 ± 33,12	249,27 ± 28,23
Elasticity (log D)	1,37 ± 0,21	1,37 ± 0,15	1,31 ± 0,18	1,30 ± 0,20	1,33 ± 0,21
LG					
Tone (Hz)	14,08 ± 0,62	14,27 ± 1,08	14,79 ± 0,95	14,62 ± 0,95	14,36 ± 0,44
Stiffness (N/m)	246,37 ± 13,91	242,83 ± 14,21	249,40 ± 17,65	245,67 ± 17,67	245,87 ± 12,50
Elasticity (log D)	1,34 ± 0,16	1,21 ± 0,14	1,25 ± 0,16	1,26 ± 0,17	1,26 ± 0,19
MG					
Tone (Hz)	14,75 ± 0,82	15,70 ± 1,09	15,75 ± 0,93	15,66 ± 1,09	14,90 ± 0,88
Stiffness (N/m)	244,37 ± 14,40	248,40 ± 17,35	249,93 ± 13,03	245,27 ± 20,89	240,20 ± 16,28
Elasticity (log D)	1,47 ± 0,12	1,34 ± 0,12	1,38 ± 0,17	1,38 ± 0,20	1,35 ± 0,22

Els valors s'expressen com a mitjana ± desviació estàndard . * $p \leq 0.05$ en comparació amb el dia 1. VL: *vastus lateralis*, VM: *vastus medialis*, RF: *rectus femoris*, BF: *biceps femoris*, LG: *lateral gastrocnemius*, MG: *medial gastrocnemius*, C1: competició 1, C2: competició 2, FP: *familiarization phase*, R1: *rest day 1*, R2: *rest day 2*.

El RF és l'únic múscul que va augmentar progressivament la seva rigidesa muscular durant la setmana i va acabar l'últim dia (262,13 ± 23,11) amb un valor significativament més alt ($p = 0,032$) en comparació amb el primer dia (242,97 ±

27,47). L'elasticitat va augmentar significativament durant la setmana ($p = 0,011$), independentment del múscul, amb una mediana el dia 1 de 1,37 i el dia 5 de 1,29. El múscul VL va millorar la seva elasticitat ($p = 0,020$), disminuint el valor logarítmic amb una tendència a la baixa des del primer dia ($1,47 \pm 0,20$) fins al cinquè ($1,19 \pm 0,20$) (Figura 16).

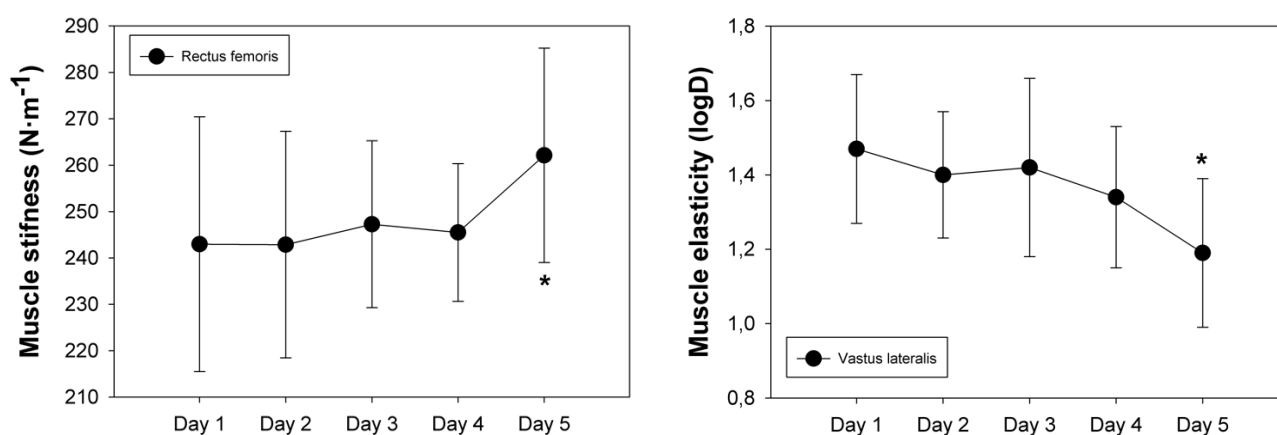


Figura 16. Evolució de la rigidesa del múscul *rectus femoris* i l'elasticitat del múscul *vastus lateralis* al llarg dels 5 dies de competició.

2. SECCIÓ II: Efectes del cicle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica

Els resultats que es presenten a continuació agrupen les respostes fisiològiques a l'exercici submàxim i l'equilibri corporal en condicions d'HH en les dos fases del CM avaluats, la F i la L mitja. També s'expliquen els resultats de les enquestes sobre la simptomatologia associada a les fase del CM i el seu impacte en el rendiment esportiu.

2.1. Espirometria

Amb l'objectiu de valorar la funció ventilatòria de les nostres participants vam realitzar una espirometria en les dos altituds (NM i HH) i fases del CM.

La **Taula 15** mostra una comparació de la funció pulmonar en repòs a NM i HH durant les fases F i L mitjançant espirometria estàndard. Com era d'esperar, es van observar discrepàncies notables entre l'altitud en FEF25-75, PEF i PIF ($p \leq 0,0001$). Aquests paràmetres es veuen influenciats per la reducció de la densitat de l'aire que es produeix a gran altitud degut a la baixa pressió baromètrica, la qual provoca una expansió del volum dels gasos (Netzer et al., 2022). No es van identificar discrepàncies significatives entre les fases del CM. L'anàlisi post-hoc va revelar diferències estadísticament significatives entre les fases del CM i l'altitud en FEV1/FVC ($p < 0,0001$) i FET ($p = 0,028$).

Taula 15. Resultats de l'espirometria forçada en descans.

Parameters	Altitude	Follicular (n=19)	Luteal (n=19)	p-value MC phase	Cohen's d	p-value MC x altitude
FVC (L)	SL	3,97 (0,45)	3,99 (0,46)	0,691	-0,025	0,223
	HH	3,95 (0,45)	3,92 (0,43)	0,433	0,073	
FEV1 (L)	SL	3,31 (0,43)	3,35 (0,48)	0,260	-0,083	0,695
	HH	3,35 (0,39)	3,36 (0,43)	0,806	-0,032	
FEV1/FVC (%)	SL	0,83 (0,06)	0,84 (0,06)	0,841	-0,09	<0,0001
	HH	0,85 (0,05)	0,86 (0,05)	0,687	-0,158	
FEF25-75 (L/s)	SL	3,67 (0,84)	3,72 (1,03) #	0,545	-0,058	0,603
	HH	4,09 (1,05)	4,23 (1,11)	0,454	-0,131	
PEF (L/s)	SL	7,20 (1,63)	7,61 (1,26) #	0,157	-0,281	0,954
	HH	8,32 (2,00)	8,74 (1,42)	0,200	-0,247	
FET (s)	SL	6,06 (1,16)	5,84 (1,32)	0,384	0,179	0,028
	HH	5,58 (1,35)	5,28 (1,35)	0,314	0,219	
FIVC (L)	SL	3,76 (0,49)	3,76 (0,41)	1,000	-0,004	0,486
	HH	3,73 (0,49)	3,81 (0,43)	0,095	-0,18	
PIF (L/s)	SL	4,84 (1,27)	4,79 (1,50) #	0,804	0,035	0,991
	HH	5,61 (1,59)	5,57 (1,52)	0,827	0,029	

Valors mitjans i desviació estàndard. # Diferències significatives entre altituds, SL versus HH ($p \leq 0,0001$). Les interaccions entre els factors d'altitud i les fases del CM estan en negreta per a un valor de $p \leq 0,05$. MC: menstrual cycle; SL: sea level; HH: Hipòxia hipobàrica, FVC: forced vital capacity; FEV1: forced expiratory volume in the first second, FEV1/FVC: ràtio FEV1/FVC, FEF25-75: forced expiratory flow between 25% and 75% of forced vital capacity, PEF: peak expiratory flow, FET: forced expiratory time, FIVC: forced inspiratory volume capacity, PIF: peak inspiratory flow.

2.2. Respostes cardiorespiratòries durant l'exercici a alta altitud

La **Taula 16** mostra les dades de la resposta cardiorespiratòria durant les fases F i L durant la prova d'exercici submàxim en HH. Es van observar diferències significatives en SaO_2 ($p \leq 0,01$) entre les dues fases del CM, amb una major oxigenació en la fase L (versus F), independentment de la intensitat de l'exercici.

La **Figura 17** mostra la representació de les dades en cada fase del CM i en les dos intensitats de l'exercici. El VC registrat a alta intensitat es va reduir significativament a la fase L en comparació amb la fase F ($p = 0,053$), amb una disminució del 7,69%. La tendència general, no sempre estadísticament significativa, de R_f , $\dot{V}_E$ i SaO_2 , va mostrar un augment a la fase L (versus F), tant a baixa com a alta intensitat. Aquest patró és consistent amb un major treball respiratori en les dones per aconseguir les demandes de $\dot{V}_E$ durant l'exercici (Guenette et al., 2007). Les comparacions múltiples van revelar diferències

SECCIÓ II: Efectes del cicle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica

estadísticament significatives en VC, $\dot{V}_E$ i Borg entre la intensitat i les fases del CM ($p = 0,033$, $p \leq 0,0001$, $p \leq 0,0001$, respectivament). També hi ha resultats significatius entre comparacions per parells, entre intensitats d'exercici en la mateixa o diferent fase del CM. Això sembla suggerir que la intensitat de l'exercici juga un paper important en la influència de les hormones femenines a gran altitud.

Taula 16. Respostes cardiorespiratòries a diferents intensitats d'exercici en condicions d'hipòxia hipobàrica.

Parameters	Exercise intensity	Follicular (n=17)	Luteal (n=17)	p-value MC phase	Cohen's d	p-value MC phase x exercise intensity
VT (L)	Low	1,47 0,36)	1,50(0,26) #	0,786	-0,073	0,033
	High	1,82 (0,31)	1,69 (0,20) *	0,053	0,506	
Rf (breaths/min)	Low	15,64(4,21)	16,25(5,13) #	0,649	-0,131	0,223
	High	19,97 (5,56)	22,03 (6,07)	0,154	-0,353	
$\dot{V}_E$ (L/min)	Low	22,05(4,38)	23,54(5,85) #	0,353	-0,289	<0,0001
	High	35,67 (9,38)	36,72 10,16)	0,818	-0,109	
SaO₂ (%)	Low	76,90 (3,26)	78,70 (4,00) +	0,061	-0,484	0,625
	High	75,95 (4,29)	77,15 (2,96)	0,090	-0,326	
HR (bpm)	Low	122,95(11,33)	123,90 (13,36) #	0,704	-0,078	0,579
	High	146,30(14,02)	148,30 (13,53)	0,203	-0,147	
Borg	Low	9,00 (1,49)	9,00 (1,59) #	1,000	0	<0,0001
	High	12,45 (1,05)	11,95 (1,54)	0,175	0,378	

Valors mitjans i desviació estàndard. * Diferències significatives entre fases del cicle menstrual ($p \leq 0,05$), # Diferències significatives entre intensitats d'exercici a altitud simulada, baixa versus alta ($p \leq 0,0001$), + Diferències significatives entre fases del cicle menstrual sense tenir en compte la intensitat de l'exercici ($p \leq 0,01$). Les interaccions entre la intensitat de l'exercici i les fases del cicle menstrual estan en negreta per a un valor de $p \leq 0,05$. MC: menstrual cycle, VT: *tidal volume*, Rf: *respiratory frequency*, $\dot{V}_E$: ventilació, SaO₂: saturació d'oxigen arterial, HR: *heart rate*.

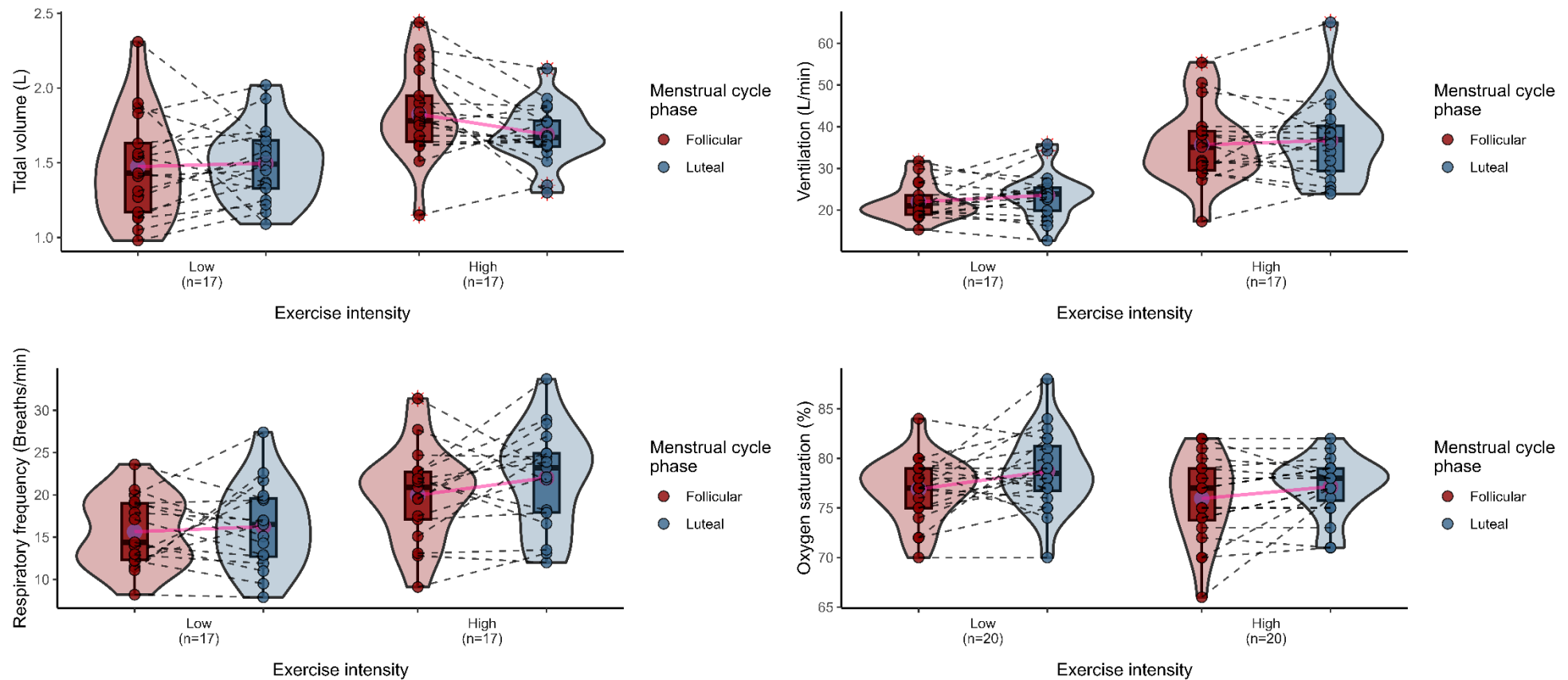


Figura 17. Respostes cardiorespiratòries en condicions d'hipòxia hipobàrica. Els diagrames de violí representen cada variable (*Tidal volume*, *Ventilation*, *Respiratory frequency*, *Oxygen saturation*) segons les intensitats d'exercici (*Low i High*) i les fases del cicle menstrual (*Follicular i Lútea*). Les corbes de densitat representen la distribució de les dades, amb diagrames de caixes interns que mostren el rang interquartílic i els valors medians. Es mostren els valors individuals, connectats amb línies discontinües per indicar les mesures repetides de cada participant. Les mitjanes estan ressaltades en vermell i connectades per facilitar la comparació entre fases.

2.3. Pressió sanguínia i freqüència cardíaca de recuperació després de l'exercici

La pressió sistòlica i diastòlica es van mesurar immediatament després de la finalització de l'exercici i no es van trobar diferències entre les fases del CM. A més, la recuperació de la FC es va mesurar durant els tres minuts post-exercici i no es van observar diferències significatives entre les fases del CM.

2.4. Control de l'equilibri corporal

La **Taula 17** mostra com només la velocitat lateral en UO va ser estadísticament diferent entre les fases del CM, amb una velocitat més alta en la fase L (4,88) en comparació amb la fase F (4,24) ($p = 0,045$). No obstant això, es van trobar diferències significatives entre les condicions oculars en la longitud del CoP, la velocitat mitjana del CoP i la velocitat anterior ($p \leq 0,05$), curiosament amb més desequilibris en la condició UO. L'anàlisi d'interacció va mostrar efectes globals significatius en la longitud del CoP, la velocitat mitjana del CoP i les velocitats lateral i anterior ($p = 0,033$, $p = 0,049$, $p = 0,028$, $p = 0,029$, respectivament). Una anàlisi posterior de les comparacions per parells va revelar significança en la longitud del CoP, la velocitat mitjana del CoP i la velocitat lateral, indicant més inestabilitat en la fase L en la condició UO (versus F amb UT).

Taula 17. Resultats de l'equilibri corporal en condicions d'hipòxia hipobàrica.

Parameters	Eyes	Follicular (n=19)	Luteal (n=19)	p-value MC phase	Cohen's d	p-value MC phase x eyes
Length (mm)	Open	313,01 (90,06)	350,36 (95,52) #	0,123	-0,400	0,033
	Closed	280,32 (77,53)	299,08 (91,43)	0,418	-0,223	
Surface (mm ²)	Open	179,68 (183,46)	158,36 (165,03)	0,595	0,124	0,837
	Closed	114,24 (109,23)	139,13 (189,80)	0,709	-0,162	
Length/Surface (1/mm)	Open	4,84 (5,05)	4,49 (3,37)	0,952	0,082	0,846
	Closed	5,03 (4,93)	5,44 (4,54)	0,702	-0,087	
Mean velocity of CoP (mm/s)	Open	5,38 (1,51)	6,05 (1,66) #	0,165	-0,417	0,049
	Closed	4,87 (1,35)	5,19 (1,56)	0,421	-0,222	
Lateral velocity (mm/s)	Open	4,24 (1,11)	4,88 (1,43) *	0,045	-0,488	0,028
	Closed	3,88 (1,17)	4,15 (1,12)	0,408	-0,232	
Antero-posterior velocity (mm/s)	Open	3,26 (1,17)	3,49 (1,04) #	0,360	-0,211	0,029
	Closed	2,88 (0,86)	3,08 (1,25)	0,587	-0,193	
Lateral variation (mm)	Open	2,03 (1,18)	1,78 (0,86)	0,632	0,236	0,669
	Closed	1,87 (1,05)	1,63 (0,82)	0,184	0,259	
Antero-posterior variation (mm)	Open	3,41 (2,74)	3,60 (2,56)	0,763	-0,072	0,832
	Closed	3,23 (2,13)	3,30 (2,70)	0,984	-0,031	
x-axis displacement (mm)	Open	-9,16 (8,88)	-9,19 (10,59)	0,393	0,003	0,398
	Closed	-7,39 (8,92)	-6,88 (9,80)	0,745	-0,055	
y-axis displacement (mm)	Open	2,56 (20,81)	-1,23 (12,75)	0,745	0,221	0,229
	Closed	0,54 (16,78)	6,92 (14,13)	0,151	-0,408	

Valors mitjans i desviació estàndard. *Diferències significatives entre fases del cicle menstrual ($p \leq 0,05$), # Diferències significatives entre condicions dels ulls, (oberts versus tancats) ($p \leq 0,0001$). Les interaccions entre la condició visual i les fases del cicle menstrual estan en negreta per a un valor de $p \leq 0,05$. MC; *menstrual cycle*, CoP: centre de pressió.

2.5. Síntomes del cicle menstrual i l'impacte en el rendiment esportiu

La qualitat de vida menstrual es va avaluar mitjançant el qüestionari CVM-22 i es va enquestar a les participants en línia per mesurar l'impacte negatiu de les fases del CM en l'entrenament i la competició. Els resultats del CVM-22 (**Taula 18**) van indicar clarament que el benestar psicològic i cognitiu van ser les àrees més afectades durant els dies menstruals. Les respostes "algunes vegades" de les participants, pel que al benestar psicològic, salut física i símptomes, van ser del 47,50%, 39% i 27,50%, respectivament. La freqüència dels símptomes i l'impacte

negatiu en el rendiment de l'exercici es mostren a les **Figures 18** i la **Figura 19**, respectivament. La fase premenstrual va ser la fase més simptomàtica seguida de prop per la fase menstrual, amb una mitjana de 6,12 i 5,89 símptomes, respectivament. Els canvis d'humor, l'acne, els antulls i la irritabilitat van ser més prevalents en la fase premenstrual, caracteritzada en el SPM (Daley, 2009). La fase menstrual va ser més afectada per símptomes somàtics que mentals. Aquest resultat contrasta amb les respostes del CVM-22. Els dies menstruals van tenir l'impacte més gran en el rendiment esportiu en general, amb un 88,2% (n=15) de les participants que van respondre informant efectes negatius. Aquests van ser seguits pels dies premenstruals amb un 35,3% (n=6). Aquests resultats coincideixen amb el total dels participants que van alterar la seva càrrega d'entrenament durant els dies menstruals (80%, n=16). A més, un 40% (n=8) de les participants van interrompre la seva rutina d'entrenament durant aquesta fase del CM.

Taula 18. Resultats del qüestionari CVM-22.

Dimensions	Frequencies			
	Always	Often	Sometimes	Never
Health perception and physical/functional well-being	5	13	39	43
Psychological and cognitive well-being	5,63	16,88	47,50	30
Symptoms	3,75	15	27,50	53,75

Les freqüències s'expressen com a percentatge del total de la mostra. CVM-22: *calidad de vida menstrual*.

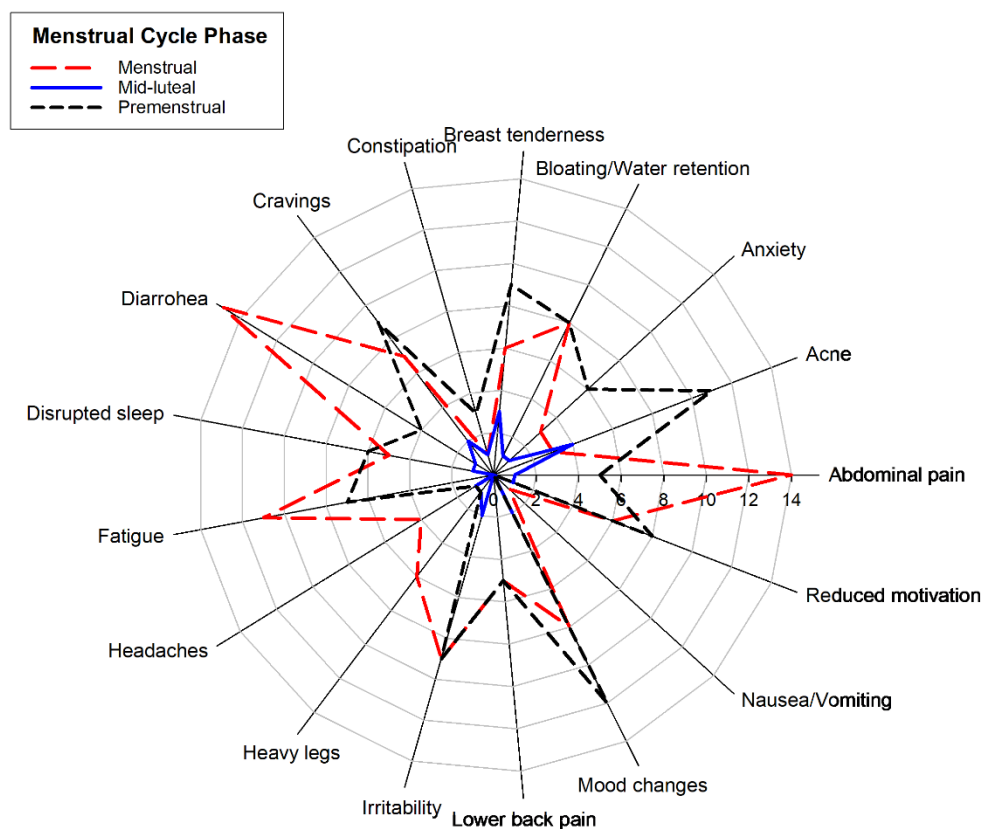


Figura 18. Relació de símptomes en les fases del cicle menstrual.

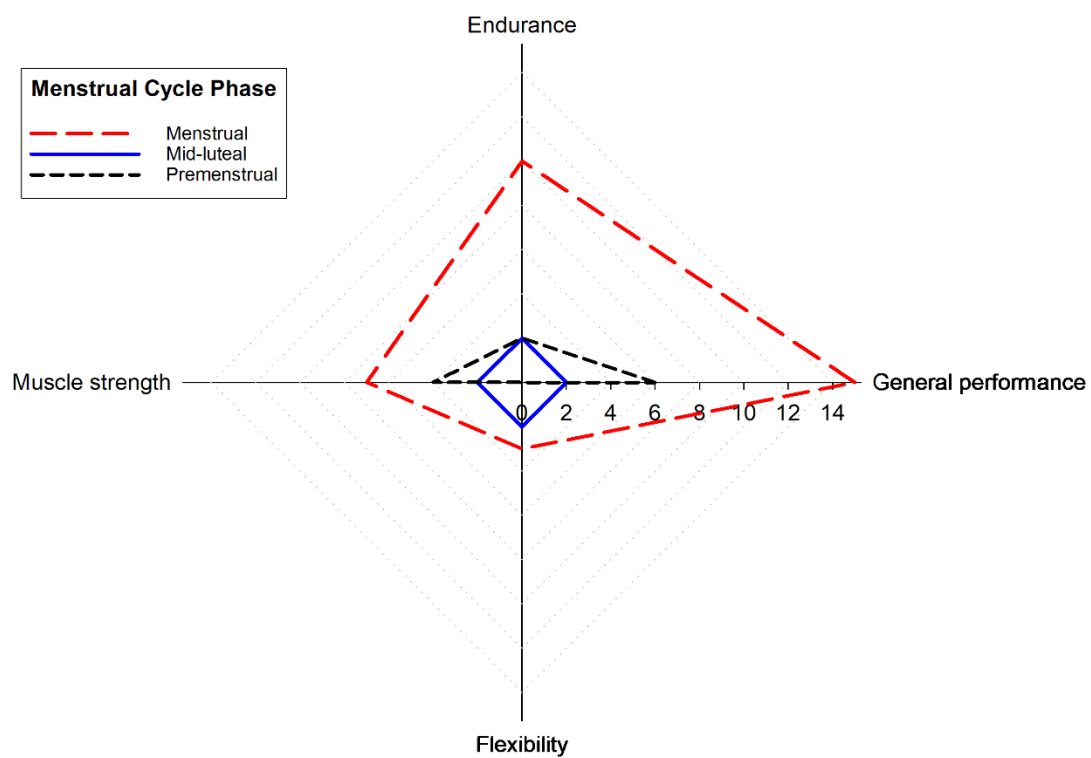


Figura 19. Impacte negatiu dels símptomes en el rendiment esportiu.

3. SECCIÓ III: Efectes dels anticonceptius hormonal en el rendiment aeròbic-anaeròbic

Els resultats obtinguts fins al moment i que es presenten a continuació han de considerar-se provisionals, ja que l'estudi encara es troba en una fase de recopilació de dades. Tot i que els descobriments actuals proporcionen informació preliminar valuosa, és necessari realitzar una anàlisi més exhaustiva un cop s'hagi completat la recopilació de dades addicionals. S'espera que la inclusió de més participants i l'obtenció d'un conjunt de dades més ampli permetin realitzar conclusions més precises i generalitzables. Per tant, els descobriments presentats en aquest moment no han de ser interpretats com a definitius.

Per tal de comprendre la influència de les hormones exògenes, administrades regularment amb AH, amb el rendiment físic de les atletes de rem professionals, es va dissenyar una prova amb alta validesa ecològica. Les participants van realitzar una prova submàxima de 2.000 metres en un remergòmetre. Durant la prova, es van mesurar diversos paràmetres fisiològics indicadors de la capacitat aeròbica i anaeròbica, així com l'eficiència de les participants en el gest del rem.

Les preparacions d'AH van mostrar una variabilitat de marques comercials entre les participants; de 5 participants es van utilitzar 4 tipus d'AH diferents. Tot i així, tots ells eren monofàsics (4 AO i 1 anell vaginal). La mostra reduïda i les diferències entre les concentracions hormonal podrien tenir unes implicacions en les respostes fisiològiques i com a tal és una limitació de l'estudi. Per tal d'analitzar l'efecte de les hormones exògenes es va comparar entre dos grups que representaven les dos fases del cicle: la FAH i la FNAH. Es van analitzar cinc variables abans i després de la prova submàxima i se'n van obtenir els valors mitjans i màxims durant la realització (**Taula 19**).

Taula 19. Resultats comparatius entre les fases del cicle induït per anticonceptius hormonals.

Variable	Cicle hormonal	Mitjana (DE)	Diferència Mitjana (IC al 95%)	Mida de l'efecte	<i>d</i> de Cohen	<i>p</i> valor
Lactat Pre (mmol/L)	FAH FNAH	1,2 (0,3) 1,4 (0,7)	0,2 (-0,7 a 1,1)	-0,18	0,48	0,61
Lactat Post (mmol/L)	FAH FNAH	8,5 (1,8) 7,9 (3,5)	-0,6 (-3,5 a 2,4)	0,56	0,28	0,76
FC (ppm)	FAH FNAH	167 (12,3) 172 (8,1)	5,2 (-6,7 a 17,1)	-5,20	0,71	0,46
FC màx (ppm)	FAH FNAH	187 (9,3) 185 (8,9)	-2,2 (-15,8 a 11,4)	2,20	0,34	0,71
Potència (W)	FAH FNAH	259 (20,9) 260 (22,7)	1,0 (-1,3 a 3,3)	-1,00	0,07	0,94

DE: desviació estàndard, FC: freqüència cardíaca, Pre: previ, Post: posterior, ppm: pulsacions per minut

3.1. Lactat

En l'anàlisi del lactat previ (Lactat Pre), es va observar una mitjana d'1,2 mmol/L ($\pm 0,3$) durant la FAH i d'1,4 mmol/L ($\pm 0,7$) en la FNAH. La diferència mitjana entre ambdós moments del cicle va ser de 0,2 mmol/L (95% IC, -0,8 a 1,1), sense assolir significació estadística ($p = 0,61$). Pel que fa al lactat posterior (Lactat Post), la mitjana va ser de 8,5 mmol/L ($\pm 1,8$) en la FAH i de 7,9 mmol/L ($\pm 3,5$) en la FNAH. La diferència mitjana va ser de -0,6 mmol/L (95% IC, -3,5 a 2,4), també sense diferències significatives ($p = 0,76$). Pel que fa a la mida de l'efecte els resultats mostren que la FAH s'associa amb un augment de mitjana de 0,56 unitats en el valor del Lactat Post). D'altra banda, s'observa una disminució mitjana de 0,18 unitats en el Lactat Pre durant la FAH en comparació amb la FNAH del cicle d'anticonceptius hormonals, resultats que no van ser significatius estadísticament. El valor *d*-Cohen va revelar unes diferències petites en el Lactat Post ($d \approx 0,28$) suggerint un efecte menor entre els moments del cicle, possiblement no rellevant clínicament. D'altra banda el Lactat Pre ($d \approx 0,48$) podria indicar un impacte entre moderat i considerable al comparar entre les fases del cicle. Tot i que, com que aquestes diferències no van ser estadísticament significatives, possiblement degut a la petita

mida de la mostra estudiada ($n=5$), suggereixen que els canvis podrien ser deguts a l'atzar.

3.2. Freqüència cardíaca

Pel que fa a la FC mitjana, el valor observat va ser de 167 ppm ($\pm 12,3$) durant la FAH i de 172 ppm ($\pm 8,11$) durant la FNAH, amb una diferència mitjana de 5,2 ppm (95% IC, -6,7 a 17,1) amb un valor per sota de la significança ($p = 0,46$). En relació amb la freqüència cardíaca màxima (FC màx), els valors mitjans registrats van ser de 187 ppm ($\pm 9,3$) en la FAH i de 185 ppm ($\pm 8,9$) en la FNAH. La diferència mitjana va ser de -2,2 ppm (95% IC, -15,8 a 11,4), sense arribar a la significació estadística ($p = 0,71$). El tamany de l'efecte del FAH en comparació amb la FNAH va mostra un augment de mitjana de 2,20 en la FC màx i una disminució mitjana de 5,20 en la FC, resultats que no van arribar a la significança estadística. Els valors de d -Cohen van mostrar un impacte petit en la FC màx ($d \approx 0,34$) i moderat en la FC ($d \approx 0,71$) respecte les fases del cicle, tot i que els valors no van ser significatius.

3.3. Potència

Finalment, pel que fa a la potència mitjana, es va registrar una mitjana de 259 W ($\pm 20,9$) per a la FAH i de 260 W ($\pm 22,7$) per a la FNAH, amb una diferència mitjana de 1,0 W (-1,3 a 3,3) i un p -valor de 0,94. Així doncs, es va observar una disminució mitjana de només 1 watt en la potència desenvolupada en la prova durant la FAH en comparació amb la FNAH del cicle de AH. Finalment la mida de l'efecte va ser molt petita ($d \approx 0,07$) indicant una diferència marginal entre els dos moments del cicle menstrual.

DISCUSSIÓ

1. SECCIÓ I: Resposta muscular en una cursa ciclista femenina

Estudis anteriors han utilitzat MyotonPRO® com a eina de seguiment per prevenir lesions i millorar el rendiment en els esports (Meerits et al., 2014; Pożarowszczyk et al., 2017). No obstant això, fins on sabem, no s'ha realitzat cap altre estudi en ciclistes professionals que avaluï les propietats musculars immediatament abans i després d'una cursa de 5 dies de competició.

Els resultats presentats en aquest estudi mostren una disminució del to muscular, la rigidesa i la disminució logarítmica immediatament després de finalitzar la cursa en comparació amb els nivells abans de la cursa, cosa que confirma l'efecte que la competició té sobre els músculs involucrats en el pedaleig (**Figura 15**). Tot i que es necessiten més estudis al respecte, sembla que la disminució del to muscular i la rigidesa post-exercici pot ser causada per almenys dues causes diferents: un factor d'estrès abans i durant la competició (Edmonds et al., 2015; Mateo et al., 2012) i la fatiga neuromuscular post-competició (García-Manso et al., 2011; Leppik et al., 2004).

1.1. Estrès psicològic

Segons diversos estudis, el to muscular es veu afectat per allò que s'anomena tensió muscular (Mense & Gerwin, 2010). A la vegada, la tensió muscular depèn de factors psicològics, com l'estrès o l'ansietat, que estan relacionats amb un augment de l'activitat muscular. A partir d'una revisió crítica de la literatura sobre la tensió muscular i el trastorn d'ansietat generalitzada, existeixen diverses propostes. Una d'elles és la preocupació excessiva, que pot portar a mantenir certes postures i una tensió estàtica en els músculs durant un llarg període de temps. Un exemple conegut per moltes persones és la sensació de músculs tensos després d'una activitat que requereix alts nivells de concentració i esforç cognitiu, com un examen acadèmic. Per objectivar aquesta hipòtesi, alguns

investigadors proposen mesurar la tensió muscular amb EMG (electromiografia) mentre els subjectes miren enregistraments amb contingut preocupant o angoixant (Pluess et al., 2009). Altres autors han demostrat l'associació entre l'estrès laboral i la tensió muscular (Lundberg et al., 1999, 1999). També s'ha observat que els anomenats *trigger points* són responsables d'una disfunció múscul esquelètica provocant dolor miofascial crònic (Lavelle et al., 2007), i mostren una activitat EMG més alta durant una situació d'estrès mental que en una situació de control (McNulty et al., 1994).

Diversos estudis reforcen la idea que les competicions esportives condueixen a condicions d'estrès, com en el cas del nostre estudi. Hi ha una àmplia evidència científica disponible sobre la relació entre la variabilitat de la freqüència cardíaca (VFC) i l'ansietat en situacions prèvies a la competició (Blásquez et al., 2009; Mateo et al., 2012; Souza et al., 2019). En un estudi recent, es van estudiar els paràmetres hemodinàmics i la VFC en un grup de ciclistes. Es van recollir dades de VFC 5 dies abans d'una competició i es van tornar a avaluar abans de l'inici de la cursa, també van utilitzar l'escala anomenada "Competitive State Anxiety Inventory-2" (CSAI-2), que es coneix per ser eficaç en l'avaluació de l'ansietat en els esports (Fernandes et al., 2012). Els resultats van confirmar que la competició de ciclisme és una situació d'estrès capaç d'alterar el control autonòmic dels paràmetres hemodinàmics. També s'han observat canvis significatius en la VFC, juntament amb alteracions en l'ansietat previs a competicions de bicicròs (Mateo et al., 2012). Resultats similars s'han observat en altres disciplines com la natació (Blásquez et al., 2009).

1.2. Fatiga neuromuscular

1.2.1. To muscular i rigidesa muscular

Un altre aspecte que pot afectar el to muscular i la rigidesa després de l'exercici intens és la fatiga neuromuscular. Els resultats d'aquest estudi demostren la disminució del to muscular i la rigidesa, en diferents músculs, després de la competició suggerint que la intensitat de l'esforç, la fatiga muscular, la

deshidratació, els canvis en la temperatura de la pell i l'alteració de la conductivitat de la pell són algunes de les possibles causes que poden justificar aquest comportament (García-Manso et al., 2011).

En molts estudis, la fatiga muscular s'ha avaluat mitjançant un seguiment estàtic, mesurant substrats, metabòlits o altres productes químics utilitzant tècniques bioquímiques, com ara lactat, creatina fosfoquinasa, hormones o EMG. Les nostres dades concorden amb estudis anteriors que han utilitzat la tensiografia (TMG) per examinar la relació entre la cursa de llarga distància i la fatiga neuromuscular, mitjançant l'avaluació de la fatiga muscular després d'un *ultra trail* a Lanzarote (García-Manso et al., 2011). En l'anomenat estudi, van trobar diferències significatives ($p = 0,006$) amb un augment del desplaçament radial màxim, és a dir amb una deformació del ventre muscular, que representa una pèrdua de rigidesa muscular en el múscul bíceps femoral, després de l'esport, i una tendència similar del recte femoral. Aquests resultats donen suport a les nostres troballes, on la rigidesa del RF va disminuir al acabar la C2 ($p = 0,009$) i en el BF en la C1 ($p = 0,03$) (**Taula 13**). Cal tenir en compte que en l'estudi de García-Manso et al., (2011) els autors van realitzar les mesures prèvies a la competició el dia abans de la cursa, a diferència del nostre estudi, eliminant el possible factor d'estrès immediat pre-competitiu, i hipotèticament, la significació seria major.

Diversos estudis han relacionat valors alts de deformació muscular amb la manca de massa muscular o una fatiga muscular significativa (Dahmane et al., 2001; Krizaj et al., 2008).

En el nostre estudi, la rigidesa muscular es va reduir en tots els músculs avaluats al finalitzar una o totes dues curses ciclistes (**Taula 13**). Aquests resultats coincideixen amb els trobats per Viitasalo et al., (1982), que van observar una disminució del 30–35% de l'activitat EMG integrada dels músculs VL i VM durant una contracció isomètrica màxima, després d'una cursa d'esquí de fons de 85 km, i Gibson et al., (2001), que van examinar l'activitat neuromuscular al llarg de 100 km de ciclisme amb intervals d'alta intensitat entre 1 i 4 km, i van analitzar la potència de sortida, les mesures d'EMG i el glucogen muscular. Sorprenentment, l'activitat EMG va disminuir paral·lelament amb una reducció de la potència de sortida, i

aquest fenomen va augmentar amb el temps, fins que es va completar el recorregut de 100 km (Gibson et al., 2001).

En un altre experiment amb corredors d'ultra maratons, després d'una cursa de 65 km (Millet et al., 2002), es va testar la contracció voluntària màxima (CVM) i la fatiga neuromuscular dels músculs extensors del genoll i flexors plantar, observant-se una disminució significativa de la CVM ($p = 0.005$), principalment a causa d'una disminució en l'activació voluntària màxima ($p = 0.001$) en els músculs extensors del genoll. La disminució de la CVM després de l'activitat coincideix amb els resultats del nostre estudi. Altres autors també han observat danys clars a les fibres musculars després de les competicions de llarga distància, on l'exercici va ser intens (Koller et al., 1998) Es van trobar resultats oposats després de l'entrenament de força, on els paràmetres musculars van augmentar després de l'entrenament (Canon & Goubel, 1995; Howell et al., 1993).

Altres factors també poden explicar com la fatiga provoca una disminució de la resposta mecànica muscular. Probablement, els factors més importants són l'acumulació d' H^+ i fosfat inorgànic, una limitació de l'alliberament de Ca^{2+} del reticle sarcoplasmàtic (Leppik et al., 2004), una reducció de la sensibilitat de les miofibrilles al Ca^{2+} , i una disminució del nombre de ponts creuats (Allen et al., 1995; Metzger & Moss, 1990).

Una altra possible causa de la fatiga és la disminució dels inputs neurals, ja que s'ha observat que, en exercicis prolongats, hi ha una reducció dels impulsos corticoespinals que afecten les neurones motores (Davis & Bailey, 1997). A més, l'alta oxidació d'àcids grassos després de l'exercici de llarga durada suggereix que el triptòfan lliure al cervell podria contribuir a aquesta activació reduïda (Davies & Thompson, 1986). D'una banda, el triptòfan lliure és un precursor de la serotonina, i de l'altra, l'augment de l'activitat serotoninèrgica pot induir fatiga inhibint el sistema dopaminèrgic. Les modificacions del substrat oxidatiu podrien haver provocat una disminució dels impulsos corticoespinals (Millet et al., 2002).

Els canvis en l'excitabilitat cortical, com modificacions de la via aferent del fus muscular, poden reduir el reflex d'estirament produït per exercicis intensos

d'estirament-escurament cíclics (Avela et al., 1999), afectant específicament les fibres intrafusals i les propietats viscoelàstiques del múscul. Cal mencionar que els efectes de la fatiga muscular sobre la capacitat de resposta de l'òrgan tendinós de Golgi i la seva influència sobre la neurona motora alfa no estan completament clars (Windhorst & Boorman, 1995)

1.2.2. Elasticitat muscular

El tercer paràmetre observat és l'elasticitat, caracteritzat per la disminució logarítmica de les oscil·lacions realitzades pel MyotonPRO® en el teixit. Aquest paràmetre descriu la dissipació o pèrdua d'energia mecànica quan el teixit recupera la seva forma després de la deformació. Els resultats del nostre estudi mostren que en el múscul VL, el valor després de la cursa és més baix que abans de començar i millora l'elasticitat, al llarg de la setmana (**Figura 16**). Com més baix és el valor logarítmic, menys energia es necessita per modificar el teixit, i més elàstic és aquest múscul (Gavronski et al., 2007). El nostre estudi va mostrar resultats significatius d'increment de l'elasticitat del RF en la C1 ($p = 0.015$) i en la C2 ($p = 0.010$). El VL va augmentar la seva elasticitat en la C1 ($p = 0.023$) i el VM en la C2 ($p = 0.036$).

Un estudi anterior va mostrar un augment gairebé significatiu de l'elasticitat durant 7 dies de competició d'elit de ciclisme masculí en els músculs RF i BF (Gervasi et al., 2017). Els autors van justificar aquesta tendència com un efecte de l'expressió plausible del to i la rigidesa muscular. Aquests resultats es poden entendre a través de la relació entre aquests dos músculs. El RF i el BF, són dos grups musculars antagonistes (el BF provoca la flexió del genoll i el RF l'extensió) i estan implicats en moviments oposats en la mateixa articulació.

Un factor molt important per a un atleta és l'índex de recuperació de la capacitat de treball muscular, és a dir, la fase de relaxació (Tschakovsky & Sheriff, 2004). Des del punt de vista de la biomecànica, un múscul elàstic hauria de recuperar la seva forma inicial de manera més eficient que un amb menys elasticitat. Es necessita energia per superar la resistència a les propietats viscoelàstiques del múscul antagonista i del múscul en contracció (Elliott &

Worthington, 2001; Hein & Vain, 1998). L'energia elàstica es emmagatzemada al múscul durant un cicle d'estirament-escurçament muscular per ser utilitzada en un moviment dinàmic (Komi, 2000).

Els músculs VL i RF van disminuir el to i la rigidesa després de la competició, sent uns dels músculs més activats en el ciclisme (Jammes et al., 2001; da Silva et al., 2016). La variabilitat de la competició mateixa també és un factor clau que pot afectar els músculs de manera diferent, depenent de si l'etapa de la cursa implica ports de muntanya o si es realitza en terreny pla, i per tant la posició a sobre la bicicleta pot variar, de la posició dempeus o asseguda (Arkesteijn et al., 2016; Vogt et al., 2008). Tot i que no vam aprofundir en aquests aspectes en aquest treball, cal més recerca enfocada en aquest tema.

Vam observar també com l'elasticitat al llarg de la setmana, independentment dels músculs, va augmentar significativament ($p = 0.011$), i el seu valor logarítmic va disminuir. Només el VL va incrementar significativament la seva propietat elàstica al final de la setmana competitiva ($p = 0.020$) (**Figura 16**). Aquests resultats concorden amb els trobats en un estudi previ; durant 7 dies d'una competició masculina de ciclisme, els músculs amb millor elasticitat van ser el BF i el RF (Gervasi et al., 2017).

Curiosament, l'evolució de la rigidesa basal dels músculs al llarg de la setmana va ser oposada a la tendència general de disminució d'aquesta en les situacions post-competició. A més a més, el RF va incrementar la seva rigidesa muscular, significativament al final de la setmana (**Figura 16**). Aquest augment en la rigidesa es pot justificar per una sobrecàrrega muscular crònica. Això pot ocórrer degut a contraccions sostingudes al llarg del temps i a l'activitat repetitiva, normalment caracteritzada per l'exercici físic intens requerit per certes disciplines esportives, com en el nostre cas, quan la fatiga s'acumula durant una setmana competitiva. Aquesta condició de sobrecàrrega està implicada en un augment de la tensió i la rigidesa en el teixit miofascial (Vissing & Haller, 2012). Tot i que aquest augment està poc documentat a la literatura científica, alguns autors argumenten que durant l'exercici físic, els ions Ca^{2+} s'acumulen en el sarcoplasma de la cèl·lula muscular, contribuint a les contractures musculars. Per tant, aquestes

contractures poden ser atenuades amb un període de descans i recuperació (Leppik et al., 2004; Vissing & Haller, 2012).

2. SECCIÓ II: Efectes del cicle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica

Aquest experiment tenia la finalitat d'avaluar els efectes del CM sobre el rendiment aeròbic en condicions de HH i tractar d'entendre com les fases del CM poden afectar en el rendiment esportiu. Per tant, ens vam centrar en analitzar les respostes ventilatòries i cardiorespiratòries durant un exercici d'intensitat submàxima i el control postural al llarg del CM (Elliott-Sale et al., 2021).

2.1. Espirometria

Els paràmetres d'espirometria forçada basats en les característiques anatòmiques van romandre constants durant totes les fases del CM, tant a NM com a HH (**Taula 15**), resultats en consonància amb un estudi previ en el qual no es van trobar diferències entre les fases del CM en FVC i FEV1 (Beidleman et al., 1999). Per contra, altres estudis van trobar un augment en la taxa de PEF a la fase L (versus F) (Samsudeen & Rajagopalan, 2016) i una correlació positiva entre FVC, FEV1 i FEV1/FVC (Mannan et al., 2008) amb la progesterona plasmàtica en una situació de normòxia. Com era d'esperar, es van trobar diferències significatives entre les altituds en FEF 25-75, PEF i PIF ($p \leq 0,0001$), degut a la menor densitat de l'aire en condicions de baixa pressió baromètrica i HH, on es van trobar valors més alts a causa de la reduïda resistència a la convecció de l'aire (Netzer et al., 2022). Així mateix, una avaluació exhaustiva de la relació entre les fases del CM i les altituds en FEV1/FVC va revelar una associació estadísticament significativa ($p = 0,0001$). Concretament, aquesta variable va mostrar nivells més alts durant la fase L a HH (en comparació amb la fase L i F a NM) i la fase F en HH (en comparació amb la fase F a NM). A més, el FET es va reduir en la fase L i HH en comparació amb el NM ($p = 0,016$).

2.2. Pressió sanguínia i freqüència cardíaca de recuperació després de l'exercici

La pressió sistòlica, la pressió diastòlica i la FC durant la recuperació de l'exercici no van canviar significativament al llarg del CM en condicions de HH. Resultats similars s'han reportat a 4,300 m en repòs (Mazzeo et al., 1998). No obstant això, els valors es van reportar al segon dia després de l'arribada a l'altitud, a diferència d'aquest estudi, que es va realitzar sota una exposició aguda a hipòxia. Resultats inconsistents també s'han trobat en repòs en condicions de normòxia (Citherlet et al., 2025; Thakrar et al., 2024). Els efectes oposats sobre el to vascular, dels estrògens (vasodilatadors) i la progesterona (vasoconstrictors) (Sarrel, 1999), podrien explicar els resultats variables a la literatura. En acord amb un informe previ (Tagliapietra et al., 2024), la taxa de recuperació de la FC no es veu alterada al llarg del CM.

2.3. Respostes cardiorespiratòries durant l'exercici a alta altitud

No es van observar canvis significatius entre les fases del CM en les següents variables; R_f , $\dot{V}_E$, SaO_2 , FC i Borg en HH (**Taula 16**) a les dues intensitats d'exercici. Aquests resultats són consistents amb els informes d'altres autors (Beidleman et al., 1999; Citherlet et al., 2025; Dombovy et al., 1987; Macnutt et al., 2012; Takase et al., 2002) i també es mantenen en condicions de repòs (Citherlet et al., 2025; Macnutt et al., 2012). S'han observat resultats contradictoris amb una $\dot{V}_E$ més alta a la fase L en comparació amb la fase F durant l'exercici a 3,600 m (Brutsaert et al., 2002) i a NM (Rael et al., 2021). Els resultats del nostre experiment contradiuen els resultats d'una recerca prèvia, on es va observar la $\dot{V}_E$ en condicions de repòs en HH (Tagliapietra et al., 2024), però són consistents amb els resultats en hipòxia normobàrica (Citherlet et al., 2024). Diversos estudis (Basualto-Alarcón et al., 2012; Beidleman et al., 2014; Faiss et al., 2013) han demostrat que les respostes dels sistemes respiratori i cardiovascular en condicions de HH difereixen respecte aquells sota hipòxia normobàrica. Malgrat que aquest aspecte ha estat àmpliament discutit (Millet & Debevec, 2020; Richalet, 2020), existeixen unes

limitacions d'extrapolar les condicions normobàriques a les condicions hipobàriques, a causa de les disparitats en el PCO_2 arterial i el pH plasmàtic. Per tant, és necessari realitzar més investigacions per proporcionar una comprensió més completa de la RVH (resposta ventilatòria hipòxica) en el sexe femení.

D'altra banda, s'ha informat d'una major valoració de l'esforç percebut durant la menstruació en comparació amb altres fases (Delp et al., 2023).

La nostre hipòtesi inicial plantejava un major rendiment aeròbic durant la fase L, la qual es basa en estudis previs realitzats a NM, on s'han determinat una major ventilació explicada pels efectes de la progesterona. Sembla que la hormona predominant en la fase L millora la quimiosensibilitat dels quimiorceptors de l'hipotàlem, provocant una disminució del llindar del centre respiratori medullar i un augment de la ventilació (Goldsmith & Glaister, 2020; Janse de Jonge, 2003; Rael et al., 2021; Samsudeen & Rajagopalan, 2016; Williams & Krahenbuhl, 1997). Aquest efecte s'amplifica per l'estradiol, que es troba durant els dies mitjans de la fase lúcia, que també incrementa el nombre de receptors de progesterona i estimula la $\dot{V}_E$ (Brodeur et al., 1986). A més, s'han trobat interaccions significatives entre les fases del CM i la intensitat de l'exercici en VC, $\dot{V}_E$ i Borg ($p = 0,033$, $p < 0,0001$, $p < 0,0001$, respectivament).

La **Figura 17** il·lustra les variables cardiorespiratòries. El VC durant l'exercici d'alta intensitat a HH va ser significativament més baix a la fase L (1,69 L) que a la fase F (1,82 L) ($p = 0,053$), amb una mida de l'efecte moderat (Cohen's $d = 0,506$). Un altre estudi va trobar una disminució en el VC en repòs a la fase L en comparació amb la fase F (0,71 i 0,81 L; $p = 0,027$, respectivament), tot i que aquests resultats ja no eren evidents durant l'exercici a gran altitud (Tagliapietra et al., 2024). Contràriament a aquesta tendència, R_f i $\dot{V}_E$ van augmentar a la fase L tot i que els resultats no van ser estadísticament significatius, la mida de l'efecte era gairebé moderat pel que fa a la R_f (Cohen's $d=0,353$). Aquests resultats mostren el patró respiratori femení amb un major treball respiratori per compensar les demandes de ventilació durant l'exercici, probablement causat pels menors volums pulmonars i els diàmetres més estrets de les vies respiratòries (Guenette et al., 2007).

La SaO₂ va augmentar durant la fase L en comparació amb la fase F a HH, independentment de la intensitat de l'exercici ($p \leq 0,01$), amb resultats marginalment significatius ($p = 0,06$ i $p = 0,090$ per la baixa i l'alta intensitat, respectivament). Es van trobar unes mides de l'efecte moderats a baixa intensitat (Cohen's $d = 0,484$) i alta intensitat (Cohen's $d = 0,326$) (**Figura 17**). Aquest resultat està recolzat per altres autors (Beidleman et al., 1999; Richalet et al., 2020). Sorprenentment, la SaO₂ va augmentar independentment de la ventilació, aquesta resposta ja s'havia informat prèviament en l'exposició aguda a gran altitud (Beidleman et al., 1999; Bender et al., 1989). Una millora del contingut i el transport d'oxigen arterial sota hipòxia aguda (Beidleman et al., 1999) i un augment de la capacitat de difusió pulmonar (Smith et al., 2015) durant la fase L podrien explicar aquests resultats. Contràriament, en altres informes no s'han observat canvis (Dombovy et al., 1987; Macnutt et al., 2012). A més, altres autors van trobar nivells més alts de SaO₂ a la fase mitjana fol·licular durant l'exercici, però sense canvis en repòs (Citherlet et al., 2025).

En resum, no es va observar una variació significativa ni sistemàtica en la RVH al llarg del CM. No obstant això, cal destacar que les particularitats fisiològiques femenines podrien tenir un petit efecte sobre la funció respiratòria, especialment pel que fa al VC i la SaO₂, tot i que aquest efecte és insuficient per afectar al rendiment aeròbic (Beidleman et al., 1999). Les troballes discrepants entre estudis podrien ser degudes a diferències en les característiques de les participants, la mida de la mostra, el tipus i nivell d'hipòxia, l'estat d'aclimatació, la determinació del CM i les intensitats d'exercici.

2.4. Control de l'equilibri corporal

La velocitat lateral del CoP amb UO va augmentar significativament durant la fase L amb un tamany de l'efecte moderat ($p = 0,045$; Cohen's $d = 0,488$), la qual cosa suggereix més inestabilitat en aquesta fase en comparació amb la fase F (**Taula 17**). Fins on sabem, aquest és el primer informe que estudia els efectes del CM sobre l'equilibri corporal en condicions hipòxiques. Els estudis previs a NM

SECCIÓ II: Efectes del cicle menstrual en el rendiment esportiu en condicions d'hipòxia hipobàrica

coincideixen amb els nostres resultats mostrant una tendència similar amb un major desequilibri durant la fase mitja-lúcia ($p = 0,06$) (Fridén et al., 2003), mentre que altres van trobar una major velocitat lateral i anterior durant la fase d'ovulació (Aziz et al., 2023; Lee et al., 2017) i el període preovulatori (Elvan et al., 2024). Els receptors d'estrògens i progesterona localitzats en el múscul esquelètic, els ossos, els lligaments i el sistema nerviós podrien modificar l'estructura i la funció d'aquests teixits i estar relacionats amb els canvis en el control postural i l'equilibri al llarg del CM (Lee et al., 2017). La longitud, la velocitat mitjana del CoP i la velocitat anterior amb UO no van canviar entre les fases del CM, tot i que es van trobar efectes moderats i petits (Cohen's $d = 0,400$, $d = 0,417$ i $d = 0,211$, respectivament), aquesta tendència també va ser recolzada per altres informes (Aziz et al., 2023; Reschechtko et al., 2023).

Tot i que la influència dels sistemes vestibular, visual i somatosensorial sobre l'equilibri corporal i el control postural ha estat ben descrita (Hall, 2015; Rodrigues et al., 2017), sorprenentment, els nostres resultats van mostrar una major inestabilitat dels participants amb UO, independentment de la fase del CM. Existeix la hipòtesis que la HH altera ràpidament la funció visual, afectant el sistema nerviós central, augmentant-ne el temps de reacció (Debenham et al., 2021; Nordahl et al., 1998; Pun et al., 2018). També s'ha estudiat que pot provocar limitacions cognitives importants (Regard et al., 1989). Aquestes alteracions podrien justificar un control més inestable de l'equilibri corporal amb UO que amb UT sota hipòxia aguda, ja que a NM, el paper de la visió pot determinar un millor equilibri postural estàtic (Tomomitsu et al., 2013), també entre els atletes (Hammami et al., 2014). No obstant això, no hi ha una explicació consistent de com la hipòxia pot afectar les vies sensorial-motors i impactar el control neural de l'equilibri (Debenham et al., 2021).

Es van trobar interaccions entre les fases del CM i la condició visual en la longitud de la trajectòria del CoP, la velocitat mitjana del CoP, i les velocitats laterals i anteriors ($p = 0,033$, $p = 0,049$, $p = 0,028$, $p = 0,029$, respectivament). L'anàlisi post-hoc va revelar una reducció de l'estabilitat postural durant la fase L amb UO (versus la fase F amb UT) en la longitud del CoP, la velocitat mitjana del CoP i la velocitat

lateral, la qual cosa coincideix amb informes previs (Fridén et al., 2005). Es requereix més investigació per determinar les veritables implicacions del cicle menstrual i les hormones sexuals femenines sobre el control de l'equilibri corporal en el context de la hipòxia aguda i el paper compensatori de la funció visual.

2.5. Síntomes del cicle menstrual i l'impacte en el rendiment esportiu

En el nostre estudi, 18 de les 20 participants van informar de símptomes durant el CM. Els símptomes més comuns declarats, sense tenir en compte la fase, van ser dolor abdominal, canvis d'humor, diarrea i irritabilitat. La mitjana de símptomes per cicle menstrual va ser de 7,093. Segons les fases, la fase premenstrual va ser la més afectada pels símptomes, amb una mitjana de 6,12 símptomes, una mitjana de 5,89 símptomes durant la fase menstrual i 2,75 a la fase mitja-luteïna.

Durant la fase menstrual, vam trobar que la diarrea era el símptoma més prevalent (75%, n=15), en segon lloc el del dolor abdominal (70%, n=14) i la fatiga (55%, n=11), la qual cosa coincideix amb la literatura (Oester et al., 2024; Solli et al., 2020), seguida de símptomes mentals com irritabilitat (45%, n=9) i canvis d'humor (40%, n=8), mentre que altres autors van suggerir que les afectacions mentals són més freqüents durant la fase menstrual que els símptomes somàtics (Bruinvels et al., 2021). Durant la fase premenstrual, els canvis d'humor van ser el símptoma més prevalent (60%, n=12), seguit d'acne, antulls, irritabilitat, reducció de la motivació i inflor (**Figura 18**).

En aquest estudi, el 90% (n=18) dels participants van informar de símptomes que afectaven negativament el seu rendiment esportiu. Aquest resultat està recolzat pels resultats d'una recent revisió sistemàtica exploratòria, on van indicar que entre el 2,8% i el 100% dels atletes la causa principal de l'impacte percebut en el seu rendiment eren els símptomes del cicle menstrual (Oester et al., 2024). Els dies de la fase menstrual van ser els més afectats, amb un 88,2% (n=15), la qual cosa coincideix amb estudis previs (Doohan et al., 2023; Martin et al., 2018; McNulty et al., 2023; Solli et al., 2020; Taim et al., 2024), seguit dels dies de la fase

premenstrual, que van afectar negativament el seu rendiment en un 35,3% (n=6). Tot i que s'ha observat una prevalença més alta (76,6%) associada amb el SPM i la disminució del rendiment (Yi & Bae, 2021). En aquest estudi, vam utilitzar el terme "síntomes premenstruals" per considerar les afectacions entre els últims quatre dies abans de la menstruació. Cal assenyalar que no hi ha consens a la literatura sobre la terminologia utilitzada per parlar dels símptomes abans i durant la menstruació, sent els termes més comuns el SPM o els símptomes premenstruals (Angst et al., 2001; Oester et al., 2024). Fins al 11,8% dels nostres participants van informar que la fase mitja-lútia va perjudicar el seu rendiment. Així mateix, s'ha demostrat que les fases 3 i 2 del cicle eren les menys afectades negativament en termes d'activitat física i rendiment del cicle (Ekenros et al., 2022; Solli et al., 2020). L'exercici de resistència va ser la qualitat física més afectada durant la menstruació (83,3%, n=10), seguit de la força muscular (63,6%, n=7), tot i que aquestes respostes podrien estar influenciades pel fet que els participants eren atletes de resistència (**Figura 19**). En contrast amb el nostre estudi, s'ha informat que la força muscular es va veure afectada en la mateixa mesura que la forma física aeròbica (Ekenros et al., 2022).

Un nombre significatiu de respostes (80%, n=16) van informar que havien modificat les seves sessions d'entrenament ajustant la intensitat o la durada a causa dels símptomes. Aquests dades són consistents amb el nombre d'atletes que van informar de símptomes durant el cicle menstrual (n=18). De manera similar, altres informes van descriure que parts de l'entrenament durant les fases menstrual i premenstrual van ser modificades a causa dels símptomes (Prado et al., 2022; Righi & Barroso, 2022), però, en contrast, en un altre informe només el 22% dels atletes van informar d'haver adaptat el seu entrenament a causa dels efectes secundaris del cicle menstrual, tot i que van informar d'una alta incidència de dolor abdominal (83%) (Solli et al., 2020). En el nostre estudi, la proporció d'atletes que s'abstenen d'entrenar o competir a causa dels símptomes va ser del 40% (n=8), aquesta tendència té certa concordança amb informes previs (Ekenros et al., 2022; McNulty et al., 2023) i contrasta amb altres troballes (Martin et al., 2018), que van

informar que només el 4,2% de les atletes van deixar d'entrenar o competir a causa de la menstruació.

Malgrat el gran nombre de símptomes informats a la literatura al llarg del CM, no hi ha consistència en el nombre de participants que adapten o es perden les sessions d'entrenament. Aquesta discrepància podria ser explicada per diferents hipòtesis. Probablement, mentre que les atletes femenines poden informar sobre símptomes relacionats amb la menstruació, no els consideren com una raó significativa per aturar l'entrenament. Addicionalment, sembla que són reticents a parlar dels seus símptomes amb els seus entrenadors (Findlay et al., 2020). Una comunicació efectiva entre les atletes i els entrenadors és essencial per facilitar un diàleg obert sobre la salut menstrual i els símptomes relacionats, desafiant l'estigma que envolta aquest tema (Righi & Barroso, 2022). Hi ha un acord general que es necessita més investigació per aprofundir en la relació entre els símptomes i el rendiment al llarg del cicle menstrual, principalment a causa de les àmplies diferències metodològiques trobades a la literatura.

Gairebé la meitat de les participants (47,5%) van respondre al qüestionari CVM-22 que els símptomes psicològics (irritabilitat, canvis d'humor, tristesa, etc.) estan presents "algunes vegades" durant la fase menstrual, seguit per la salut física (39%) i els símptomes (27,50%) (**Taula 18**), la qual cosa no coincideix amb els resultats del formulari en línia, que mostraven els símptomes físics com els més prevalents durant la fase menstrual.

3. SECCIÓ III: Efectes dels anticonceptius hormonal en el rendiment aeròbic-anaeròbic

Amb l'objectiu d'analitzar la influència de les hormones exògenes, en les respostes fisiològiques i el rendiment físic es van comparar les respostes durant la fase FAH i la fase FNAH i els resultats preliminars no van identificar cap diferència significativa en els paràmetres que reflecteixen el rendiment en una prova submàxima. Fins al moment, confirmem la hipòtesis inicial d'un rendiment esportiu estable durant les fases d'un cicle hormonal regulat per anticonceptius hormonal, tot i així caldrà esperar ampliar la mostra per obtenir-ne conclusions contrastades. Tenint en compte les característiques de la prova submàxima i la implicació dels diferents sistemes energètics, degut a la intensitat i el volum del test s'han separat els resultats en potència anaeròbica i rendiment aeròbic.

3.1. Potència anaeròbica

Alguns autors han demostrat com la potencia anaeròbica es veu afectada per l'ús d'AH, suggerint que atletes com és el cas de saltadores i velocistes que depenen del cicle estirament-escurçament podrien experimentar beneficis si competeixen durant la FAH (Bushman et al., 2006; Giacomoni et al., 2000; Rechichi & Dawson, 2009). Tot i així, l'evidència de les millores en el rendiment de força reactiva durant aquesta fase encara resta d'estar plenament compresa (Rechichi & Dawson, 2009). En la bibliografia s'ha observat una reducció del lactat sanguini màxim i un augment del pH durant la FNAH comparat amb la FAH (Ekenros et al., 2013) i altres autors han recolzat aquesta mateixa idea observant valors més elevats de lactat sanguini en la FAH versus FNAH (Rechichi et al., 2008; Vaiksaar et al., 2011a). Encara que possiblement l'augment de 1 mmol/L de lactat en sang tingui una rellevància fisiològica mínima i pugui estar dins del marge d'error metodològic de mesura per aquesta variable (Rechichi et al., 2008). Per tant, aquests resultats coincideixen amb els nostres tot i no ser estadísticament

significatius. Una hipòtesis que podria explicar aquests resultats és que la capacitat tamponadora i el volum plasmàtic són més influents en els valors de lactat en comptes dels canvis en el metabolisme de substrats degut a variacions en els nivells d'estrògens (Hackney, 1990). En proves de curta i alta intensitat és possible que els esteroides exògens no disposin de temps suficient per influir de manera rellevant en els substrat i la capacitat tamponadora del lactat (Ekenros et al., 2013).

En relació a la producció mitjana de potència no es van observar diferències significatives entre les fases del cicle, resultat recolzat per altres estudis en ciclistes (Rechichi et al., 2008).

3.2. Rendiment aeròbic

Alguns estudis recolzen els nostres resultats posant de manifest que no existeixen diferències en el rendiment aeròbic entre les diferents fases del cicle d'AO en remadores (Vaiksaar et al., 2011a, 2011b) ni tampoc en altres modalitats esportives (Rebelo et al., 2010). Concretament, no s'han trobat diferències significatives en les concentracions de lactat en sang després de l'exercici (Vaiksaar et al., 2011b), ni en la FC, la ventilació pulmonar i el consum d'oxigen en proves de resistència cardiovascular (Giacomoni & Falgairette, 2000; Vaiksaar et al., 2011b). Aquests resultats suggereixen una certa estabilitat dels paràmetres metabòlics i cardiorespiratoris durant l'exercici aeròbic, malgrat les fluctuacions hormonals derivades de l'ús d'anticonceptius hormonals.

D'altra banda, altres estudis han suggerit que els AH podien afectar negativament el rendiment aeròbic i el $\dot{V}O_2\text{max}$ (Giacomoni & Falgairette, 2000; Notelovitz et al., 1987). S'ha observat com l'ús de AO trifàsics durant quatre mesos pot reduir el $\dot{V}O_2\text{max}$ en dones moderadament entrenades (Casazza et al., 2002).

DISCUSSIÓ GENERAL

Els objectius d'aquesta tesi s'han centrat en la resposta de diferents sistemes i el seu impacte en el rendiment esportiu en el sexe femení i les diferents fases del cicle menstrual i l'ús d'anticonceptius hormonals.

Concretament la SECCIÓ I d'aquest treball ha correspost a un experiment que tenia com a objectiu avaluar les propietats musculars i els seus canvis després de la competició en una població femenina. La SECCIÓ II ha mostrat els resultats d'un estudi que va valorar els efectes de les fases del cicle menstrual en el rendiment aeròbic en condicions d'hipòxia hipobàrica sense prèvia aclimatació i finalment en la SECCIÓ III s'han avaluat els efectes dels anticonceptius hormonals en el rendiment esportiu aeròbic-anaeròbic.

Els estudis realitzats tracten diferents àrees del rendiment esportiu, tot i així tots parteixen d'una població femenina i tenen com a objectiu comú entendre diferents particularitats fisiològiques del sexe femení en l'àmbit de l'entrenament i la competició esportiva. L'aproximació d'aquest treball pretén omplir un buit històric en la investigació de les ciències de l'esport on la població femenina ha estat subrepresentada i per tant s'han menystingut les diferències biològiques implícites del sexe femení en comparació amb el sexe masculí (Costello et al., 2014). Quan parlem del sexe femení ens referim a un terme biològic descrit pels cromosomes sexuals (XX) a diferència del sexe masculí (XY) i a les característiques físiques femenines determinades per les hormones femenines alliberades de manera cíclica (CM) a partir de la pubertat, de la mateixa manera que existeix una masculinització degut a les concentracions de testosterona en el sexe oposat (Joyner et al., 2025).

La recerca en el sexe femení no només és important per evitar perpetuar el model masculí com a norma en l'àmbit esportiu i per tant visibilitzar la dona esportista, sinó que extrapolar resultats obtinguts del sexe masculí pot comportar un coneixement incomplet i esbiaixat i en conseqüència implicar errors d'interpretació i recomanacions inapropiades alhora de dissenyar programes d'entrenament o protocols de prevenció de lesions. Per tal d'entendre la fisiologia humana en tota la seva complexitat cal entendre les respostes del sexe femení a l'exercici. Un altre

aspecte que justifica la recerca en el sexe femení ve donat per la classificació històrica dins la competició esportiva en diferents variables com l'edat, el sexe, categoria de pes, etc. L'objectiu d'acotar aquests determinants fisiològics és permetre que la competició sigui el més objectiva possible i el que determini els guanyadors i les guanyadores siguin les habilitats o fenotips que depenen de les adaptacions a l'entrenament (Joyner et al., 2025). De la mateixa manera que separem els sexes en les competicions cal estudiar-los per separat per conèixer les similituds i diferències envers la resposta a l'exercici físic.

Els resultats obtinguts en aquesta tesi evidencien la importància d'analitzar-los de manera transversal per tal d'entendre millor la temàtica estudiada.

D'una banda a la SECCIÓ I de la tesi s'han abordat els efectes de la competició sobre les propietats musculars tant de manera immediata al finalitzar l'activitat com a mig termini un cop acabada una competició setmanal en la població femenina (Rotllan et al., 2024). És ben sabut com la fatiga neuromuscular pot afectar el to i la rigidesa musculars després d'activitats competitives de llarga durada i alta intensitat, com la competició ciclista (Viitasalo et al., 1982). D'altra banda, l'enfocament des d'una visió psicològica ens pot ajudar a entendre també perquè el to i la rigidesa musculars es veuen augmentats abans de la competició en comparació al finalitzar-la, degut a l'estrès que es produeix abans d'una prova competitiva que té repercussions augmentant el to muscular (Mateo et al., 2012). Cal mencionar també que en estudis realitzats en el sexe masculí on les curses ciclistes eren diàries, s'ha observat un augment general del to i la rigidesa musculars al llarg de la setmana independentment dels músculs analitzats (Gervasi et al., 2017) a diferència del nostre estudi on tan sols el RF va incrementar significativament la seva rigidesa muscular i la resta de músculs van adoptar tendències individuals i el VL va incrementar la seva elasticitat. Una hipòtesis que es planteja davant d'aquests resultats discrepants és la possibilitat que els dies de descans entre competicions pugui atenuar la fatiga neuromuscular en els músculs menys actius i en conseqüència l'augment de la rigidesa muscular. Cal destacar que, degut al poc recorregut històric del ciclisme professional femení, les competicions s'han caracteritzat tradicionalment per tenir distàncies més curtes i

de menys dies en comparació amb l'esport masculí. Tenint en compte la relació entre l'augment del to i la rigidesa muscular amb el risc de lesions (Gervasi et al., 2017), és fonamental impulsar futures línies de recerca centrades en l'estudi de la resposta i la recuperació musculars en dones durant la competició i el disseny de protocols de prevenció de lesions específics que englobin tant l'aspecte físic com psicològic. Aquest estudi esdevé especialment rellevant en un context d'expansió de l'esport femení professional que comporta un augment progressiu tant del nombre de competicions com de participants. En el cas del ciclisme d'alt nivell, s'estan ampliant gradualment els dies de competició en les curses amb l'objectiu d'assolir un nivell professional equiparable al masculí, com és el cas del *Tour de France*, *Tour de Suisse* i la *Vuelta femenina*.

Els resultats en relació al CM i els anticonceptius hormonals presentats en la SECCIÓ II i la SECCIÓ III respectivament, han estudiat els seus efectes en el rendiment esportiu.

Des d'un punt de vista purament fisiològic no es van observar canvis en la RVH al llarg de les fases del CM ni el rendiment aeròbic en condicions d'HH, descartant la hipòtesis inicial que considerava que el rendiment es podria veure augmentat en la fase L (Rotllan et al., 2025). Tot i així, sí que es va observar un petit efecte en la funció respiratòria amb resultats significatius amb una disminució del VC i una mida de l'efecte moderat en alta intensitat i una major SaO_2 sense tenir en compte la intensitat d'exercici durant la fase L. A més a més, es va observar un increment no significatiu de la R_f i la $\dot{V}_E$. Aquests resultats mostren un patró típicament femení durant l'exercici probablement causat per característiques fisiològiques femenines com menors volums pulmonars i diàmetres més estrets de les vies respiratòries (Guenette et al., 2007). Les hormones sexuals femenines presents en la fase L també podrien explicar aquests resultats degut a l'efecte de la P millorant la sensibilitat dels quimiorceptors de l'hipotàlem (Goldsmith & Glaister, 2020; Janse de Jonge, 2003; Rael et al., 2021) i disminuint el llindar del centre respiratori també per l'efecte dels E incrementant el número de receptors de P (Brodeur et al., 1986). Amb l'objectiu d'introduir una visió més holística del rendiment esportiu vam enquestar les participants per tal de conèixer les seves experiències subjectives

amb la simptomatologia associada al CM i en base l'impacte d'aquesta en el rendiment esportiu. Els resultats van mostrar que el 90% van informar que els símptomes al llarg del CM tenien un impacte negatiu en el rendiment esportiu. Durant la fase menstrual és quan es veia més afectat el rendiment i el 80% van modificar alguna vegada els seus entrenaments i el 40% van interrompre'ls degut a la simptomatologia. La variabilitat simptomàtica al llarg del CM subratlla la necessitat d'adoptar una visió individualitzada que permeti adaptar els entrenaments i la competició per tal de minimitzar els efectes negatius en el rendiment esportiu. D'altra banda, no es van observar diferències en les pressions sanguínies i la recuperació cardíaca després de la prova submàxima en HH en funció de les fases del CM i tot i que la velocitat lateral del CoP amb UO va augmentar significativament durant la fase L amb un tamany de l'efecte moderat, no es va traduir en un desequilibri postural global. En resum, la planificació d'entrenament en altitud ha de basar-se des d'una visió individual no pas en funció de les fase del CM.

En línies generals els efectes dels anticonceptius hormonals tampoc van mostrar diferències en el rendiment aeròbic-anaeròbic en funció de les FAH i FNAH, mostrat a la SECCIÓ III. Per tant, es corrobora la hipòtesis inicial que indicava un rendiment estable al llarg de les fases de l'ús d'anticonceptius. No es van observar diferències significatives entre la fase de consum d'hormones exògenes i la fase de descans hormonal en els nivells de lactat, la FC i la potència generada. Per tant, sembla que la suplementació amb estrògens i progestines exògenes no té efectes substancials en la capacitat aeròbica ni anaeròbica. Aquest resultats recolzats prèviament (Elliott-Sale et al., 2020) s'han d'interpretar també des d'un enfocament més aplicat i semblen indicar que els AH no s'haurien d'utilitzar com a eina per optimitzar el rendiment sinó únicament des d'un punt de vista mèdic com a control de l'embaràs, la simptomatologia associada al CM o bé per evitar que el sagnat coincideixi en dies de competició, en el cas que comporti alguna perjudici per l'esportista.

Com a conclusió, l'evidència actual marcada per un biaix androcèntric en la ciències de l'esport, suggereix que la fisiologia femenina i les hormones femenines,

tant al llarg del CM com per l'ús d'AH, no afecten de manera sistemàtica el rendiment esportiu. Per aquests motius, cal utilitzar un enfocament individual en la planificació esportiva que englobi el control del CM i l'ús personalitzat dels AH tenint en compte les necessitats de cada dona i evitar unes guies generals en funció del perfil hormonal. Caldria enfocar les futures línies d'investigació per tal de millorar la metodologia i tenir en compte la variabilitat individual al llarg d'estudis longitudinals amb l'objectiu d'optimitzar el rendiment esportiu garantint el benestar de la dona.

CONCLUSIONS

- S'han observat uns efectes immediats al acabar una cursa ciclista professional en les propietats musculars, traduint-se en una disminució significativa del to i la rigidesa musculars. Tant el factor físic degut a la fatiga neuromuscular post -exercici que pot reduir el to i la rigidesa musculars, com el factor psicològic que afecta prèviament a les competicions i pot comportar un augment del to muscular, podrien explicar aquests resultats.
- Concretament el múscul *rectus femoris* va augmentar significativament la seva rigidesa muscular al llarg de la setmana competitiva, considerant-se un dels músculs més utilitzats en el pedaleig i alhora podria estar sotmès a un major risc de lesió per sobrecàrrega. D'altra banda el múscul *vastus lateralis* va millorar la seva elasticitat significativament al llarg de la setmana competitiva.
- La resposta cardiorespiratòria es veu mínimament influenciada per les fases del cicle menstrual durant l'exercici submàxim en condicions d'hipòxia hipobàrica observant uns canvis significatius en la reducció del volum corrent i un augment de la saturació d'oxigen durant la fase lúcia mitja. Il·lustrant un patró respiratori típicament femení, justificat per la menor dimensió dels pulmons, una reducció del volums pulmonars i l'efecte estimulante de la progesterona a nivell del centre respiratori. La tendència, tot i que no significativa, d'increment de la freqüència respiratòria i la ventilació pulmonar també recolzen el patró respiratori observat.
- Tot i els petits canvis en la funció respiratòria no es va observar cap modificació significativa de la resposta ventilatòria a la hipòxia durant la realització d'un exercici submàxim i tampoc en el rendiment aeròbic en funció de les fases del cicle menstrual en condicions d'hipòxia hipobàrica aguda equivalent a quatre mil metres d'alçada i sense aclimatació prèvia .
- Al valorar l'equilibri postural en altitud es va observar com la velocitat lateral del centre de pressions va augmentar significativament en la fase lúcia mitja en comparació amb la fase fol·licular amb els ulls oberts, però la resta de paràmetres valorats no es van veure modificats.

Conclusions

- Les fases premenstrual i menstrual són les que van presentar més incidència de simptomatologia al llarg del cicle menstrual. Els símptomes premenstruals més reportats van ser els canvis d'humor, l'acne, els antulls, la irritabilitat i la reducció de la motivació a diferència de la fase menstrual on els problemes físics com la diarrea i el dolor abdominal eren més freqüents.
- L'impacte negatiu dels símptomes al llarg del cicle menstrual en el rendiment esportiu va ser reportats per un 90% de la mostra d'estudi. De les quals el 80% han modificat en algun moment la intensitat o el volum del seus entrenaments i el 40% han cancel·lat totalment l'entrenament, degut a la simptomatologia del cicle menstrual
- El rendiment aeròbic i la potència anaeròbica no es veuen alterats al llarg de les fases d'un cicle induït per anticonceptius hormonals. Per tant, l'ús d'anticonceptius hormonals ha d'estar dirigit a controlar els efectes adversos del cicle menstrual i no amb l'objectiu d'optimitzar el rendiment esportiu.
- Les limitacions fisiològiques causades per les fluctuacions del cicle menstrual i l'ús d'anticonceptius hormonals són molt subtils o nul·les en relació al seu impacte en el rendiment esportiu. Per tant, les indicacions i les planificacions d'entrenament han de basar-se en les particularitats de cada esportista en relació a l'impacte psicològic de les competicions i les variacions induïdes pel cicle menstrual que puguin ocasionar un efecte el rendiment esportiu en atletes femenines d'elit.

CONCLUSIONS

- *Immediate effects have been observed on muscle properties after finishing a professional cycling race, resulting in a significant decrease in muscle tone and stiffness. Both the physical factor due to post-exercise neuromuscular fatigue, which can reduce muscle tone and stiffness, and the psychological factor, which affects athletes before competitions and can lead to an increase in muscle tone, could explain these results.*
- *Specifically, the rectus femoris muscle significantly increased its muscle stiffness over the competitive week, being considered one of the most used muscles in pedalling and at the same time potentially exposed to a greater risk of overload injury. On the other hand, the vastus lateralis muscle significantly improved its elasticity over the competitive week.*
- *The cardiorespiratory response is minimally influenced by the phases of the menstrual cycle during submaximal exercise under hypobaric hypoxia, with significant changes observed in the reduction of tidal volume and an increase in oxygen saturation during the mid-luteal phase. This illustrates a typically female respiratory pattern, justified by smaller lung size, reduced lung volumes, and the stimulating effect of progesterone on the respiratory centre. The trend, although not significant, of an increase in respiratory rate and pulmonary ventilation also supports the observed respiratory pattern.*
- *Despite small changes in respiratory function, no significant modification was observed in the hypoxic ventilatory response during submaximal exercise, nor in aerobic performance according to the menstrual cycle phases under acute hypobaric hypoxia equivalent to four thousand metres of altitude without prior acclimatisation.*
- *When assessing postural balance at altitude, a significant increase was observed in the lateral velocity of the centre of pressure during the mid-luteal phase compared to the follicular phase with eyes open, although the other assessed parameters were not modified.*

Conclusions

- *The premenstrual and menstrual phases were those that presented the highest incidence of symptoms throughout the menstrual cycle. The most reported premenstrual symptoms were mood swings, acne, cravings, irritability, and reduced motivation, in contrast with the menstrual phase, where physical problems such as diarrhoea and abdominal pain were more frequent.*
- *The negative impact of symptoms throughout the menstrual cycle on sports performance was reported by 90% of the study sample. Of these, 80% had modified at some point the intensity or volume of their training, and 40% had completely cancelled training due to menstrual cycle symptoms.*
- *Aerobic performance and anaerobic power are not affected across the phases of a cycle induced by hormonal contraceptives. Therefore, the use of hormonal contraceptives should be aimed at managing the adverse effects of the menstrual cycle, rather than at enhancing athletic performance.*
- *The physiological limitations caused by menstrual cycle fluctuations and the use of hormonal contraceptives are very subtle or non-existent in relation to their impact on sports performance. Therefore, training guidelines and planning should be based on the particularities of each athlete in relation to the psychological impact of competitions and the cycle-induced variations that may affect sports performance in elite female athletes.*

BIBLIOGRAFIA

- Ackerman, K. E., & Misra, M. (2011). Bone health and the female athlete triad in adolescent athletes. *The Physician and Sportsmedicine*, 39(1), 131-141. <https://doi.org/10.3810/psm.2011.02.1871>
- ACOG. (2015). Menstruation in Girls and Adolescents: Using the Menstrual Cycle as a Vital Sign. *Obstetrics and Gynecology*, 126(6), e143-e146. <https://doi.org/10.1097/AOG.0000000000001215>
- Aird, L., Samuel, D., & Stokes, M. (2012). Quadriceps muscle tone, elasticity and stiffness in older males: Reliability and symmetry using the MyotonPRO. *Archives of gerontology and geriatrics*, 55(2), e31-9. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2012.03.005>
- Allen, D. G., Lännergren, J., & Westerblad, H. (1995). Muscle cell function during prolonged activity: Cellular mechanisms of fatigue. *Experimental physiology*, 80(4), 497-527. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.1995.sp003864>
- Ampatzis, C., Zervoudis, S., Iatrakis, G., & Mastorakos, G. (2022). Effect of oral contraceptives on bone mineral density. *Acta Endocrinologica*, 18(3), 355-360. <https://doi.org/10.4183/aeb.2022.355>
- Angst, J., Sellaro, R., Merikangas, K. R., & Endicott, J. (2001). The epidemiology of perimenstrual psychological symptoms. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 104(2), 110-116. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0447.2001.00412.x>
- Antero, J., Golovkine, S., Niffoi, L., Meignié, A., Chassard, T., Delarochelambert, Q., Duclos, M., Maitre, C., Maciejewski, H., Diry, A., & Toussaint, J.-F. (2023). Menstrual cycle and hormonal contraceptive phases' effect on elite rowers' training, performance and wellness. *Frontiers in Physiology*, 14, 1110526. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1110526>
- Arkesteijn, M., Jobson, S., Hopker, J., & Passfield, L. (2016). The Effect of Cycling Intensity on Cycling Economy During Seated and Standing Cycling. *International journal of sports physiology and performance*, 11(7), 907-912. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0441>
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2020, octubre 23). A/RES/71/313—E - A/RES/71/313. <https://web.archive.org/web/20201023121826/https://undocs.org/A/RES/71/313>
- Avela, J., Kyröläinen, H., & Komi, P. V. (1999). Altered reflex sensitivity after repeated and prolonged passive muscle stretching. *Journal of applied physiology*, 86(4), 1283-1291. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.4.1283>
- Aziz, H. M. A., Aziz, K. S. A., Wahab, A. E. R. H. A. E., & El-Shafei, M. A. (2023). Effect of ovulation on postural sway in association with sex hormone variation across the menstrual cycle in college students: An observational study. *Bulletin of Faculty of Physical Therapy*, 28(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s43161-023-00136-9>
- Bailey, S. P., Zacher, C. M., & Mittleman, K. D. (2000). Effect of menstrual cycle phase on carbohydrate supplementation during prolonged exercise to fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 88(2), 690-697. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.2.690>
- Bambaeichi, E., Reilly, T., Cable, N. T., & Giacomoni, M. (2004). The isolated and combined effects of menstrual cycle phase and time-of-day on muscle strength of

- eumenorrheic females. *Chronobiology International*, 21(4-5), 645-660.
<https://doi.org/10.1081/cbi-120039206>
- Barba-Moreno, L., Cupeiro, R., Romero-Parra, N., Janse de Jonge, X. A. K., & Peinado, A. B. (2022). Cardiorespiratory Responses to Endurance Exercise Over the Menstrual Cycle and With Oral Contraceptive Use. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(2), 392. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003447>
- Basualto-Alarcón, C., Rodas, G., Galilea, P. A., Riera, J., Pagés, T., Ricart, A., Torrella, J. R., Behn, C., & Viscor, G. (2012). Cardiorespiratory parameters during submaximal exercise under acute exposure to normobaric and hypobaric hypoxia. *Apunts Sports Medicine*, 47(174), 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.apunts.2011.11.005>
- Beals, K. A., & Hill, A. K. (2006). The prevalence of disordered eating, menstrual dysfunction, and low bone mineral density among US collegiate athletes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 16(1), 1-23.
<https://doi.org/10.1123/ijsnem.16.1.1>
- Behan, M., & Wenninger, J. M. (2008). Sex Steroidal Hormones and Respiratory Control. *Respiratory physiology & neurobiology*, 164(1-2), 213-221.
<https://doi.org/10.1016/j.resp.2008.06.006>
- Behan, M., Zabka, A. G., Thomas, C. F., & Mitchell, G. S. (2003). Sex steroid hormones and the neural control of breathing. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 136(2-3), 249-263. [https://doi.org/10.1016/s1569-9048\(03\)00086-7](https://doi.org/10.1016/s1569-9048(03)00086-7)
- Beidleman, B. A., Fulco, C. S., Staab, J. E., Andrew, S. P., & Muza, S. R. (2014). Cycling performance decrement is greater in hypobaric versus normobaric hypoxia. *Extreme Physiology & Medicine*, 3, 8. <https://doi.org/10.1186/2046-7648-3-8>
- Beidleman, B. A., Rock, P. B., Muza, S. R., Fulco, C. S., Forte, V. A., & Cymerman, A. (1999). Exercise V̇E and physical performance at altitude are not affected by menstrual cycle phase. *Journal of Applied Physiology*, 86(5), 1519-1526.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.5.1519>
- Bell, D. R., Blackburn, J. T., Ondrak, K. S., Hackney, A. C., Hudson, J. D., Norcross, M. F., & Padua, D. A. (2011). The effects of oral contraceptive use on muscle stiffness across the menstrual cycle. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 21(6), 467-473.
<https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e318230f50a>
- Bender, P. R., McCullough, R. E., McCullough, R. G., Huang, S. Y., Wagner, P. D., Cymerman, A., Hamilton, A. J., & Reeves, J. T. (1989). Increased exercise SaO₂ independent of ventilatory acclimatization at 4,300 m. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 66(6), 2733-2738.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1989.66.6.2733>
- Berg, J. M., Stryer, L., & Tymoczko, J. L. (2007). *Bioquímica*. Reverte.
- Berz, K., & McCambridge, T. (2016). Amenorrhea in the Female Athlete: What to Do and When to Worry. *Pediatric Annals*, 45(3), e97-e102.
<https://doi.org/10.3928/00904481-20160210-03>
- Blásquez, J. C. C., Font, G. R., & Ortís, L. C. (2009). Heart-rate variability and precompetitive anxiety in swimmers. *Psicothema*, 21(4), 531-536.

- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2(2), 92-98.
- Bouchard, T., Yong, P., & Doyle-Baker, P. (2023). Establishing a Gold Standard for Quantitative Menstrual Cycle Monitoring. *Medicina*, 59(9), 1513. <https://doi.org/10.3390/medicina59091513>
- Boukari, R., Laouafa, S., Ribon-Demars, A., Bairam, A., & Joseph, V. (2017). Ovarian steroids act as respiratory stimulant and antioxidant against the causes and consequences of sleep-apnea in women. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 239, 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2017.01.013>
- Bravo-Sánchez, A., Abián, P., Jimenez, F., & Abián-Vicén, J. (2021). Structural and mechanical properties of the Achilles tendon in senior badminton players: Operated vs. Non-injured tendons. *Clinical Biomechanics*, 85, 105366. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2021.105366>
- Brekke, I. J., Puntervoll, L. H., Pedersen, P. B., Kellett, J., & Brabrand, M. (2019). The value of vital sign trends in predicting and monitoring clinical deterioration: A systematic review. *PloS One*, 14(1), e0210875. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210875>
- Bridgeman, J. T., Zhang, Y., Donahue, H., Wade, A. M., & Juliano, P. J. (2010). Estrogen receptor expression in posterior tibial tendon dysfunction: A pilot study. *Foot & Ankle International*, 31(12), 1081-1084. <https://doi.org/10.3113/FAI.2010.1081>
- Brodeur, P., Mockus, M., McCullough, R., & Moore, L. G. (1986). Progesterone receptors and ventilatory stimulation by progestin. *Journal of Applied Physiology*, 60(2), 590-595. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.2.590>
- Bruinvels, G., Goldsmith, E., Blagrove, R., Simpkin, A., Lewis, N., Morton, K., Suppiah, A., Rogers, J. P., Ackerman, K. E., Newell, J., & Pedlar, C. (2021). Prevalence and frequency of menstrual cycle symptoms are associated with availability to train and compete: A study of 6812 exercising women recruited using the Strava exercise app. *British Journal of Sports Medicine*, 55(8), 438-443. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102792>
- Brutsaert, T. D., Spielvogel, H., Caceres, E., Araoz, M., Chatterton, R. T., & Vitzthum, V. J. (2002). Exercise at altitude and the menstrual cycle. *The Journal of Experimental Biology*, 205, 233-239. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.2.233>. PMID: 11821489
- Bull, J. R., Rowland, S. P., Scherwitzl, E. B., Scherwitzl, R., Danielsson, K. G., & Harper, J. (2019). Real-world menstrual cycle characteristics of more than 600,000 menstrual cycles. *Npj Digital Medicine*, 2(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0152-7>
- Burgess, K. E., Pearson, S. J., & Onambélé, G. L. (2009). Menstrual cycle variations in oestradiol and progesterone have no impact on in vivo medial gastrocnemius tendon mechanical properties. *Clinical Biomechanics*, 24(6), 504-509. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2009.03.011>
- Burgess, K. E., Pearson, S. J., & Onambélé, G. L. (2010). Patellar tendon properties with fluctuating menstrual cycle hormones. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(8), 2088-2095. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181aeb12b>

- Burke, L. M. (2003). The IOC consensus on sports nutrition 2003: New guidelines for nutrition for athletes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 13(4), 549-552. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.13.4.549>
- Bushman, B., Masterson, G., & Nelsen, J. (2006). Anaerobic power performance and the menstrual cycle: Eumenorrheic and oral contraceptive users. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 46(1), 132-137.
- Buxton, C. L., & Atkinson, W. B. (1948). Hormonal factors involved in the regulation of basal body temperature during the menstrual cycle and pregnancy. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 8(7), 544-549. <https://doi.org/10.1210/jcem-8-7-544>
- Cagnacci, A., Volpe, A., Paoletti, A. M., & Melis, G. B. (1997). Regulation of the 24-hour rhythm of body temperature in menstrual cycles with spontaneous and gonadotropin-induced ovulation. *Fertility and Sterility*, 68(3), 421-425. [https://doi.org/10.1016/s0015-0282\(97\)00242-2](https://doi.org/10.1016/s0015-0282(97)00242-2)
- Canon, F., & Goubel, F. (1995). Changes in stiffness induced by hindlimb suspension in rat soleus muscle. *Pflugers Archiv : European journal of physiology*, 429(3), 332-337. <https://doi.org/10.1007/BF00374147>
- Carpenter, M. G., Murnaghan, C. D., & Inglis, J. T. (2010). Shifting the balance: Evidence of an exploratory role for postural sway. *Neuroscience*, 171(1), 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.08.030>
- Casazza, G. A., Suh, S.-H., Miller, B. F., Navazio, F. M., & Brooks, G. A. (2002). Effects of oral contraceptives on peak exercise capacity. *Journal of Applied Physiology*, 93(5), 1698-1702. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00622.2002>
- Chakrabarti, S., Morton, J. S., & Davidge, S. T. (2014). Mechanisms of estrogen effects on the endothelium: An overview. *The Canadian Journal of Cardiology*, 30(7), 705-712. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2013.08.006>
- Chandrashekar, N., Mansouri, H., Slauterbeck, J., & Hashemi, J. (2006). Sex-based differences in the tensile properties of the human anterior cruciate ligament. *Journal of Biomechanics*, 39(16), 2943-2950. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.031>
- Charkoudian, N., & Joyner, M. J. (2004). Physiologic considerations for exercise performance in women. *Clinics in Chest Medicine*, 25(2), 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2004.01.001>
- Chen, F.-P., Wang, K.-C., & Huang, J.-D. (2009). Effect of estrogen on the activity and growth of human osteoclasts in vitro. *Taiwanese Journal of Obstetrics & Gynecology*, 48(4), 350-355. [https://doi.org/10.1016/S1028-4559\(09\)60323-5](https://doi.org/10.1016/S1028-4559(09)60323-5)
- Chidi-Ogbolu, N., & Baar, K. (2019). Effect of Estrogen on Musculoskeletal Performance and Injury Risk. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01834>
- Chumduri, C., & Turco, M. Y. (2021). Organoids of the female reproductive tract. *Journal of Molecular Medicine*, 99(4), 531-553. <https://doi.org/10.1007/s00109-020-02028-0>
- Citherlet, T., Raberin, A., Manferdelli, G., Bourdillon, N., & Millet, G. P. (2025). Impact of the Menstrual Cycle on the Cardiovascular and Ventilatory Responses During Exercise

- in Normoxia and Hypoxia. *High Altitude Medicine & Biology*, 26(1), 55-62.
<https://doi.org/10.1089/ham.2024.0048>
- Citherlet, T., Raberin, A., Manferdelli, G., Pialoux, V., & Millet, G. P. (2024). Menstrual cycle does not impact the hypoxic ventilatory response and acute mountain sickness prediction. *Scientific Reports*, 14(1), 26087. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76404-y>
- Cole, L. A., Ladner, D. G., & Byrn, F. W. (2009). The normal variabilities of the menstrual cycle. *Fertility and Sterility*, 91(2), 522-527.
<https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2007.11.073>
- Conkin, J., & Wessel, J. H. (2008). Critique of the Equivalent Air Altitude Model. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 79(10), 975-982.
<https://doi.org/10.3357/ASEM.2331.2008>
- Corner, G. W. (1951). Our knowledge of the menstrual cycle, 1910-1950. *Lancet*, 1(6661), 919-923. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(51\)92447-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(51)92447-6)
- Costello, J. T., Bieuzen, F., & Bleakley, C. M. (2014). Where are all the female participants in Sports and Exercise Medicine research? *European journal of sport science*, 14(8), 847-851. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.911354>
- Cowley, E. S., Olenick, A. A., McNulty, K. L., & Ross, E. Z. (2021). “Invisible Sportswomen”: The Sex Data Gap in Sport and Exercise Science Research. *Women in Sport and Physical Activity Journal*, 29(2), 146-151. <https://doi.org/10.1123/wspaj.2021-0028>
- Dahmane, R., i, V. V., Knez, N., & en, I. E. (2001). Evaluation of the ability to make non-invasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response. *Medical & biological engineering & computing*, 39(1), 51-55.
<https://doi.org/10.1007/BF02345266>
- Daley, A. (2009). Exercise and premenstrual symptomatology: A comprehensive review. *Journal of Women's Health* (2002), 18(6), 895-899.
<https://doi.org/10.1089/jwh.2008.1098>
- Davies, C. T., & Thompson, M. W. (1986). Physiological responses to prolonged exercise in ultramarathon athletes. *Journal of applied physiology*, 61(2), 611-617.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1986.61.2.611>
- Davis, H. C., & Hackney, A. C. (2017). The Hypothalamic–Pituitary–Ovarian Axis and Oral Contraceptives: Regulation and Function. En A. C. Hackney (Ed.), *Sex Hormones, Exercise and Women: Scientific and Clinical Aspects* (pp. 1-17). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44558-8_1
- Davis, J. M., & Bailey, S. P. (1997). Possible mechanisms of central nervous system fatigue during exercise. *Medicine Science Sports Exercise*, 29(1), 45-57.
<https://doi.org/10.1097/00005768-199701000-00008>
- De Souza, M. J., Maguire, M. S., Rubin, K. R., & Maresh, C. M. (1990). Effects of menstrual phase and amenorrhea on exercise performance in runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(5), 575-580.
- De Souza, M. J., Miller, B. E., Loucks, A. B., Luciano, A. A., Pescatello, L. S., Campbell, C. G., & Lasley, B. L. (1998). High frequency of luteal phase deficiency and anovulation in recreational women runners: Blunted elevation in follicle-stimulating hormone observed during luteal-follicular transition. *The Journal of*

- Clinical Endocrinology and Metabolism*, 83(12), 4220-4232.
<https://doi.org/10.1210/jcem.83.12.5334>
- De Souza, M. J., Toombs, R. J., Scheid, J. L., O'Donnell, E., West, S. L., & Williams, N. I. (2010). High prevalence of subtle and severe menstrual disturbances in exercising women: Confirmation using daily hormone measures. *Human Reproduction*, 25(2), 491-503. <https://doi.org/10.1093/humrep/dep411>
- Debenham, M. I. B., Smuin, J. N., Grantham, T. D. A., Ainslie, P. N., & Dalton, B. H. (2021). Hypoxia and standing balance. *European Journal of Applied Physiology*, 121(4), 993-1008. <https://doi.org/10.1007/s00421-020-04581-5>
- Delcourt, M. L., Copenhaver, E., & Cruess, D. G. (2025). Cardiac Autonomic and Affective Reactivity to Laboratory Stressors across the Menstrual Cycle: A Systematic Review. *Behavioral Medicine*, 1-14.
<https://doi.org/10.1080/08964289.2025.2451920>
- Delp, M., Chesbro, G. A., Pribble, B. A., Miller, R. M., Pereira, H. M., Black, C. D., & Larson, R. D. (2023). Higher rating of perceived exertion and lower perceived recovery following a graded exercise test during menses compared to non-bleeding days in untrained females. *Frontiers in Physiology*, 14, 1297242.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1297242>
- Devi, S. P., & Reddy, D. V. (1953). Reduction of muscular performance during menstruation. *Journal of the Indian Medical Association*, 23(1), 13-15.
- Dombovy, M. L., Bonekat, H. W., Williams, T. J., & Staats, B. A. (1987). Exercise performance and ventilatory response in the menstrual cycle. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 19(2), 111.
- Dominelli, P. B., Wiggins, C. C., Roy, T. K., Secomb, T. W., Curry, T. B., & Joyner, M. J. (2021). The Oxygen Cascade During Exercise in Health and Disease. *Mayo Clinic Proceedings*, 96(4), 1017-1032. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2020.06.063>
- Doohan, M. A., King, N., White, M. J., & Stewart, I. B. (2023). Trends in menstrual cycle symptoms, physical activity avoidance, and hormonal contraceptive use in a general population of adult women. *Sexual & Reproductive Healthcare*, 36, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.srhc.2023.100853>
- Dragoo, J. L., Castillo, T. N., Braun, H. J., Ridley, B. A., Kennedy, A. C., & Golish, S. R. (2011). Prospective correlation between serum relaxin concentration and anterior cruciate ligament tears among elite collegiate female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(10), 2175-2180. <https://doi.org/10.1177/0363546511413378>
- Dragoo, J. L., Padrez, K., Workman, R., & Lindsey, D. P. (2009). The effect of relaxin on the female anterior cruciate ligament: Analysis of mechanical properties in an animal model. *The Knee*, 16(1), 69-72. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2008.09.005>
- D'Souza, A. C., Wageh, M., Williams, J. S., Colenso-Semple, L. M., McCarthy, D. G., McKay, A. K. A., Elliott-Sale, K. J., Burke, L. M., Parise, G., MacDonald, M. J., Tarnopolsky, M. A., & Phillips, S. M. (2023). Menstrual cycle hormones and oral contraceptives: A multimethod systems physiology-based review of their impact on key aspects of female physiology. *Journal of Applied Physiology*, 135(6), 1284-1299.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00346.2023>

- Duane, M., Stanford, J. B., Porucznik, C. A., & Vigil, P. (2022). Fertility Awareness-Based Methods for Women's Health and Family Planning. *Frontiers in Medicine*, 9, 858977. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.858977>
- Edmonds, R., Burkett, B., Leicht, A., & McKean, M. (2015). Effect of chronic training on heart rate variability, salivary IgA and salivary alpha-amylase in elite swimmers with a disability. *PloS one*, 10(6), e0127749. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127749>
- Eiling, E., Bryant, A. L., Petersen, W., Murphy, A., & Hohmann, E. (2007). Effects of menstrual-cycle hormone fluctuations on musculotendinous stiffness and knee joint laxity. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 15(2), 126-132. <https://doi.org/10.1007/s00167-006-0143-5>
- Ekenros, L., Hirschberg, A. L., Heijne, A., & Fridén, C. (2013). Oral contraceptives do not affect muscle strength and hop performance in active women. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 23(3), 202-207. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3182625a51>
- Ekenros, L., von Rosen, P., Solli, G. S., Sandbakk, Ø., Holmberg, H.-C., Hirschberg, A. L., & Fridén, C. (2022). Perceived impact of the menstrual cycle and hormonal contraceptives on physical exercise and performance in 1,086 athletes from 57 sports. *Frontiers in Physiology*, 13, 954760. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.954760>
- Elliott, G. F., & Worthington, C. R. (2001). Muscle contraction: Viscous-like frictional forces and the impulsive model. *International journal of biological macromolecules*, 29(3), 213-218. [https://doi.org/10.1016/s0141-8130\(01\)00163-5](https://doi.org/10.1016/s0141-8130(01)00163-5)
- Elliott-Sale, K. J., Ackerman, K. E., Lebrun, C. M., Minahan, C., Sale, C., Stellingwerff, T., Swinton, P. A., & C Hackney, A. (2023). Feminae: An international multisite innovative project for female athletes. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 9(4), e001675. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2023-001675>
- Elliott-Sale, K. J., Altini, M., Doyle-Baker, P., Ferrer, E., Flood, T. R., Harris, R., Impellizzeri, F. M., de Jonge, X. J., Kryger, K. O., Lewin, G., Lebrun, C. M., McCall, A., Nimphius, S., Phillips, S. M., Swinton, P. A., Taylor, M., Verhagen, E., & Burden, R. J. (2025). Why We Must Stop Assuming and Estimating Menstrual Cycle Phases in Laboratory and Field-Based Sport Related Research. *Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1007/s40279-025-02189-3>
- Elliott-Sale, K. J., McNulty, K. L., Ansdell, P., Goodall, S., Hicks, K. M., Thomas, K., Swinton, P. A., & Dolan, E. (2020). The Effects of Oral Contraceptives on Exercise Performance in Women: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1785-1812. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01317-5>
- Elliott-Sale, K. J., Minahan, C. L., Jonge, X. A. K. J. de, Ackerman, K. E., Sipilä, S., Constantini, N. W., Lebrun, C. M., & Hackney, A. C. (2021). Methodological Considerations for Studies in Sport and Exercise Science with Women as Participants: A Working Guide for Standards of Practice for Research on Women. *Sports medicine*, 51(5), 843-861. <https://doi.org/10.1007/S40279-021-01435-8>
- Elvan, A., Kirişçi, S., Başer Seğer, M., Çeliker Tosun, Ö., & Tosun, G. (2024). Does Phase of the Menstrual Cycle Affect Balance and Postural Control? *Journal of Motor Behavior*, 56(1), 69-77. <https://doi.org/10.1080/00222895.2023.2241403>

Bibliografia

- Enns, D. L., & Tiidus, P. M. (2010). The influence of estrogen on skeletal muscle: Sex matters. *Sports Medicine*, 40(1), 41-58. <https://doi.org/10.2165/11319760-000000000-00000>
- Faiss, R., Pialoux, V., Sartori, C., Faes, C., Dériaz, O., & Millet, G. P. (2013). Ventilation, oxidative stress, and nitric oxide in hypobaric versus normobaric hypoxia. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(2), 253-260. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31826d5aa2>
- Fernandes, M. G., Vasconcelos-Raposo, J., & Fernandes, H. M. (2012). Propriedades psicométricas do CSAI-2 em atletas brasileiros. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 25(4), 679-687. <https://doi.org/10.1590/S0102-79722012000400007>
- Findlay, R. J., Macrae, E. H. R., Whyte, I. Y., Easton, C., & Forrest Née Whyte, L. J. (2020). How the menstrual cycle and menstruation affect sporting performance: Experiences and perceptions of elite female rugby players. *British Journal of Sports Medicine*, 54(18), 1108-1113. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-101486>
- Fischer, G. M. (1973). Comparison of Collagen Dynamics in Different Tissues Under the Influence of Estradiol. *Endocrinology*, 93(5), 1216-1218. <https://doi.org/10.1210/endo-93-5-1216>
- Fridén, C., Hirschberg, A. L., Saartok, T., Bäckström, T., Leanderson, J., & Renström, P. (2003). The influence of premenstrual symptoms on postural balance and kinesthesia during the menstrual cycle. *Gynecological Endocrinology: The Official Journal of the International Society of Gynecological Endocrinology*, 17(6), 433-439. <https://doi.org/10.1080/09513590312331290358>
- Fridén, C., Ramsey, D. K., Backstrom, T., Benoit, D. L., Saartok, T., & Lindén Hirschberg, A. (2005). Altered postural control during the luteal phase in women with premenstrual symptoms. *Neuroendocrinology*, 81(3), 150-157. <https://doi.org/10.1159/000086592>
- García-Manso, J. M., Rodríguez-Ruiz, D., Rodríguez-Matoso, D., Saa, Y. de, Sarmiento, S., & Quiroga, M. (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG). *Journal of sports sciences*, 29(6), 619-625. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.548822>
- Gavronski, G., Veraksits, A., Vasar, E., & Maaroos, J. (2007). Evaluation of viscoelastic parameters of the skeletal muscles in junior triathletes. *Physiological Measurement*, 28(6), 625-637. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/6/002>
- Gervasi, M., Sisti, D., Benelli, P., Fernández-Peña, E., Calcabrini, C., Rocchi, M. B. L., Lanata, L., Bagnasco, M., Tonti, A., Vilberto, S., & Sestili, P. (2017). The effect of topical thiocolchicoside in preventing and reducing the increase of muscle tone, stiffness, and soreness: A real-life study on top-level road cyclists during stage competition. *Medicine*, 96(30), e7659. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000007659>
- Giacomoni, M., Bernard, T., Gavarry, O., Altare, S., & Falgairette, G. (2000). Influence of the menstrual cycle phase and menstrual symptoms on maximal anaerobic performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(2), 486-492. <https://doi.org/10.1097/00005768-200002000-00034>
- Giacomoni, M., & Falgairette, G. (2000). Decreased submaximal oxygen uptake during short duration oral contraceptive use: A randomized cross-over trial in

- premenopausal women. *Ergonomics*, 43(10), 1559-1570.
<https://doi.org/10.1080/001401300750003989>
- Gibson, A. S. C., Schabert, E. J., & Noakes, T. D. (2001). Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 281(1), R187-96.
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.2001.281.1.R187>
- Gimunová, M., Paulínyová, A., Bernaciková, M., & Paludo, A. C. (2022). The Prevalence of Menstrual Cycle Disorders in Female Athletes from Different Sports Disciplines: A Rapid Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 14243. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114243>
- Godsland, I. F. (2005). Oestrogens and insulin secretion. *Diabetologia*, 48(11), 2213-2220.
<https://doi.org/10.1007/s00125-005-1930-0>
- Goldsmith, E., & Glaister, M. (2020). The effect of the menstrual cycle on running economy. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 60(4), 610-617.
<https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.10229-9>
- Greising, S. M., Baltgalvis, K. A., Lowe, D. A., & Warren, G. L. (2009). Hormone Therapy and Skeletal Muscle Strength: A Meta-Analysis. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 64A(10), 1071-1081.
<https://doi.org/10.1093/gerona/glp082>
- Griksiene, R., & Ruksenas, O. (2011). Effects of hormonal contraceptives on mental rotation and verbal fluency. *Psychoneuroendocrinology*, 36(8), 1239-1248.
<https://doi.org/10.1016/j.psychoneu.2011.03.001>
- Grimm, S. L., Hartig, S. M., & Edwards, D. P. (2016). Progesterone Receptor Signaling Mechanisms. *Journal of Molecular Biology*, 428(19), 3831-3849.
<https://doi.org/10.1016/j.jmb.2016.06.020>
- Guenette, J. A., Witt, J. D., McKenzie, D. C., Road, J. D., & Sheel, A. W. (2007). Respiratory mechanics during exercise in endurance-trained men and women. *The Journal of Physiology*, 581(Pt 3), 1309-1322. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.126466>
- Hachul, H., Hachul de Campos, B., Lucena, L., & Tufik, S. (2023). Sleep During Menopause. *Sleep Medicine Clinics*, 18(4), 423-433.
<https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2023.06.004>
- Hackney. (1999). Influence of oestrogen on muscle glycogen utilization during exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 167(3), 273-274. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.1999.00605.x>
- Hackney, A. C. (1990). Effects of the Menstrual Cycle on Resting Muscle Glycogen Content. *Hormone and Metabolic Research*, 22(12), 647-647.
<https://doi.org/10.1055/s-2007-1004994>
- Hackney, A. C. (2021). Menstrual Cycle Hormonal Changes and Energy Substrate Metabolism in Exercising Women: A Perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19), 10024.
<https://doi.org/10.3390/ijerph181910024>
- Hackney, A. C., Curley, C. S., & Nicklas, B. J. (1991). Physiological responses to submaximal exercise at the mid-follicular, ovulatory and mid-luteal phases of the

- menstrual cycle. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 1(2), 94-98. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1991.tb00277.x>
- Hackney, A. C., Muoio, D., & Meyer, W. R. (2000). The Effect of sex steroid hormones on substrate oxidation during prolonged submaximal exercise in women. *The Japanese Journal of Physiology*, 50(5), 489-494. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.50.489>
- Hagemann, G., Ugur, T., Schleussner, E., Mentzel, H.-J., Fitzek, C., Witte, O. W., & Gaser, C. (2011). Changes in Brain Size during the Menstrual Cycle. *PLOS ONE*, 6(2), e14655. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014655>
- Halbreich, U., & Tworek, H. (1993). Altered serotonergic activity in women with dysphoric premenstrual syndromes. *International Journal of Psychiatry in Medicine*, 23(1), 1-27. <https://doi.org/10.2190/J2W0-RTGD-NYKK-FF77>
- Hale, G. E., & Burger, H. G. (2009). Hormonal changes and biomarkers in late reproductive age, menopausal transition and menopause. *Best Practice & Research. Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 23(1), 7-23. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2008.10.001>
- Hall, J. E. (2015). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* (13th edition). Saunders.
- Hall, J. E., & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th edition). Elsevier.
- Hallberg, L., Högdahl, A. M., Nilsson, L., & Rybo, G. (1966). Menstrual blood loss—A population study. Variation at different ages and attempts to define normality. *Acta Obstetricia Et Gynecologica Scandinavica*, 45(3), 320-351. <https://doi.org/10.3109/00016346609158455>
- Halson, S. L., Johnston, R. D., Pearson, M., & Minahan, C. (2024). Menstrual-Cycle Symptoms and Sleep Characteristics in Elite Soccer Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 19(9), 914-920. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2023-0049>
- Hammami, R., Behm, D. G., Chtara, M., Ben Othman, A., & Chaouachi, A. (2014). Comparison of static balance and the role of vision in elite athletes. *Journal of Human Kinetics*, 41, 33-41. <https://doi.org/10.2478/hukin-2014-0030>
- Hannan, K., Li, X., Mehta, A., Yenokyan, G., Payne, J. L., Shea, A. A., & Hantsoo, L. (2024). Mood symptoms and gut function across the menstrual cycle in individuals with premenstrual syndrome. *Hormones and Behavior*, 166, 105634. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2024.105634>
- Hansen, F. M., Fahmy, N., & Nielsen, J. H. (1980). The influence of sexual hormones on lipogenesis and lipolysis in rat fat cells. *Acta Endocrinologica*, 95(4), 566-570. <https://doi.org/10.1530/acta.0.0950566>
- Hansen, M. (2018). Female hormones: Do they influence muscle and tendon protein metabolism? *Proceedings of the Nutrition Society*, 77(1), 32-41. <https://doi.org/10.1017/S0029665117001951>
- Hansen, M., Langberg, H., Holm, L., Miller, B. F., Petersen, S. G., Doessing, S., Skovgaard, D., Trappe, T., & Kjaer, M. (2011). Effect of administration of oral contraceptives on the synthesis and breakdown of myofibrillar proteins in young women.

- Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(1), 62-72.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.01002.x>
- Hansen, M., Skovgaard, D., Reitelsheder, S., Holm, L., Langbjerg, H., & Kjaer, M. (2012). Effects of Estrogen Replacement and Lower Androgen Status on Skeletal Muscle Collagen and Myofibrillar Protein Synthesis in Postmenopausal Women. *The Journals of Gerontology: Series A*, 67(10), 1005-1013.
<https://doi.org/10.1093/gerona/gls007>
- Harlow, S. D., & Ephross, S. A. (1995). Epidemiology of Menstruation and Its Relevance to Women's Health. *Epidemiologic Reviews*, 17(2), 265-286.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.epirev.a036193>
- Harlow, S. D., Lin, X., & Ho, M. J. (2000). Analysis of menstrual diary data across the reproductive life span Applicability of the bipartite model approach and the importance of within-woman variance. *Journal of Clinical Epidemiology*, 53(7), 722-733. [https://doi.org/10.1016/S0895-4356\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0895-4356(99)00202-4)
- Hauswirth, C., & Le Meur, Y. (2011). Physiological and nutritional aspects of post-exercise recovery: Specific recommendations for female athletes. *Sports Medicine*, 41(10), 861-882. <https://doi.org/10.2165/11593180-000000000-00000>
- Hein, V., & Vain, A. (1998). Joint mobility and the oscillation characteristics of muscle. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 8(1), 7-13.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1998.tb00222.x>
- Hennegan, J., Winkler, I. T., Bobel, C., Keiser, D., Hampton, J., Larsson, G., Chandra-Mouli, V., Plesons, M., & Mahon, T. (2021). Menstrual health: A definition for policy, practice, and research. *Sexual and Reproductive Health Matters*, 29(1), 1911618.
<https://doi.org/10.1080/26410397.2021.1911618>
- Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(5), 361-374. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00027-4)
- Hessemer, V., & Brück, K. (1985). Influence of menstrual cycle on shivering, skin blood flow, and sweating responses measured at night. *Journal of Applied Physiology*, 59(6), 1902-1910. <https://doi.org/10.1152/jappl.1985.59.6.1902>
- Hohenauer, E., Bianchi, G., Wellauer, V., Taube, W., & Clijsen, R. (2024). Acute physiological responses and muscle recovery in females: A randomised controlled trial of muscle damaging exercise in hypoxia. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 16(1), 70. <https://doi.org/10.1186/s13102-024-00861-1>
- Howell, J. N., Chleboun, G., & Conatser, R. (1993). Muscle stiffness, strength loss, swelling and soreness following exercise-induced injury in humans. *The Journal of physiology*, 464, 183-196. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1993.sp019629>
- Hoyt, L. T., & Falconi, A. (2015). Puberty and Perimenopause: Reproductive Transitions and their Implications for Women's Health. *Social science & medicine*, 132, 103-112.
<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2015.03.031>
- Huston, L. J., & Wojtys, E. M. (1996). Neuromuscular performance characteristics in elite female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(4), 427-436.
<https://doi.org/10.1177/036354659602400405>

- INFAC. (2022). *Actualización en anticoncepción hormonal*. 30(6), 52-64.
- International Planned Parenthood Federation. (2013). *IMAP Short Statement on the Safety of Third and Fourth Generation Combined Oral Contraceptives*.
- Jacobi, M. P. (1876). The question of rest for women during menstruation. *National Library of Medicine*. <https://collections.nlm.nih.gov/catalog/nlm:nlmuid-67041010R-bk>
- Jammes, Y., Arbogast, S., Faucher, M., Montmayeur, A., Tagliarini, F., & Robinet, C. (2001). Interindividual variability of surface EMG changes during cycling exercise in healthy humans. *Clinical physiology*, 21(5), 556-560. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2281.2001.00369.x>
- Janse de Jonge, X. A. K. (2003). Effects of the menstrual cycle on exercise performance. *Sports Medicine*, 33(11), 833-851. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333110-00004>
- Janse De Jonge, X., Thompson, B., & Han, A. (2019). Methodological Recommendations for Menstrual Cycle Research in Sports and Exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 51(12), 2610-2617. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002073>
- Johansson, J., Nordström, A., Gustafson, Y., Westling, G., & Nordström, P. (2017). Increased postural sway during quiet stance as a risk factor for prospective falls in community-dwelling elderly individuals. *Age and Ageing*, 46(6), 964-970. <https://doi.org/10.1093/ageing/afx083>
- Joyner, M. J., Hunter, S. K., & Senefeld, J. W. (2025). Evidence on sex differences in sports performance. *Journal of Applied Physiology*, 138(1), 274-281. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00615.2024>
- Jurkowski, J. E., Jones, N. L., Toews, C. J., & Sutton, J. R. (1981). Effects of menstrual cycle on blood lactate, O₂ delivery, and performance during exercise. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 51(6), 1493-1499. <https://doi.org/10.1152/jappl.1981.51.6.1493>
- Kaur, P., Jodhka, P. K., Underwood, W. A., Bowles, C. A., de Fiebre, N. C., de Fiebre, C. M., & Singh, M. (2007). Progesterone increases brain-derived neurotrophic factor expression and protects against glutamate toxicity in a mitogen-activated protein kinase- and phosphoinositide-3 kinase-dependent manner in cerebral cortical explants. *Journal of Neuroscience Research*, 85(11), 2441-2449. <https://doi.org/10.1002/jnr.21370>
- Kellett, J. (2017). The Assessment and Interpretation of Vital Signs. En M. A. DeVita, K. Hillman, R. Bellomo, M. Odell, D. A. Jones, B. D. Winters, & G. K. Lighthall (Eds.), *Textbook of Rapid Response Systems: Concept and Implementation* (pp. 63-85). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39391-9_8
- Khowailed, I. A., & Lee, H. (2021). Neuromuscular Control of Ankle-stabilizing Muscles-specific Effects of Sex and Menstrual Cycle. *International Journal of Sports Medicine*, 42(03), 270-276. <https://doi.org/10.1055/a-1236-3654>
- Khowailed, I. A., Petrofsky, J., Lohman, E., Daher, N., & Mohamed, O. (2015). 17 β -Estradiol Induced Effects on Anterior Cruciate Ligament Laxness and Neuromuscular Activation Patterns in Female Runners. *Journal of Women's Health* (2002), 24(8), 670-680. <https://doi.org/10.1089/jwh.2014.5184>

- Kitajima, Y., & Ono, Y. (2016). Estrogens maintain skeletal muscle and satellite cell functions. *The Journal of Endocrinology*, 229(3), 267-275.
<https://doi.org/10.1530/JOE-15-0476>
- Knowlton, A. A., & Lee, A. R. (2012). Estrogen and the cardiovascular system. *Pharmacology & Therapeutics*, 135(1), 54-70.
<https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2012.03.007>
- Ko, S.-H., & Kim, H.-S. (2020). Menopause-Associated Lipid Metabolic Disorders and Foods Beneficial for Postmenopausal Women. *Nutrients*, 12(1), 202.
<https://doi.org/10.3390/nu12010202>
- Koller, A., Mair, J., Schobersberger, W., Wohlfarter, T., Haid, C., Mayr, M., Villiger, B., Frey, W., & Puschendorf, B. (1998). Effects of prolonged strenuous endurance exercise on plasma myosin heavy chain fragments and other muscular proteins. Cycling vs running. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 38(1), 10-17.
- Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: A powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of biomechanics*, 33(10), 1197-1206.
[https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(00)00064-6)
- Krizaj, D., Simunic, B., & Zagar, T. (2008). Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. *Journal of electromyography and kinesiology : official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 18(4), 645-651. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.01.008>
- Laborde, N., Carril, M., Cheviakoff, S., Croxatto, H. D., Pedroza, E., & Rosner, J. M. (1976). The secretion of progesterone during the periovulatory period in women with certified ovulation. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 43(5), 1157-1163. <https://doi.org/10.1210/jcem-43-5-1157>
- LaStayo, P. C., Woolf, J. M., Lewek, M. D., Snyder-Mackler, L., Reich, T., & Lindstedt, S. L. (2003). Eccentric Muscle Contractions: Their Contribution to Injury, Prevention, Rehabilitation, and Sport. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 33(10), 557-571. <https://doi.org/10.2519/jospt.2003.33.10.557>
- Lavelle, E. D., Lavelle, W., & Smith, H. S. (2007). Myofascial Trigger Points. *Medical Clinics of North America*, 91(2), 229-239. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.mcna.2006.12.004>
- Lebrun, C. M. (1993). Effect of the different phases of the menstrual cycle and oral contraceptives on athletic performance. *Sports Medicine*, 16(6), 400-430.
<https://doi.org/10.2165/00007256-199316060-00005>
- Lebrun, C. M., Joyce, S. M., & Constantini, Naama W., C. (2020). Effects of Female Reproductive Hormones on Sports Performance. En A. C. Hackney & N. W. Constantini (Eds.), *Endocrinology of Physical Activity and Sport* (pp. 267-301). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33376-8>
- Lee, B. J., Cho, K. H., & Lee, W. H. (2017). The effects of the menstrual cycle on the static balance in healthy young women. *Journal of Physical Therapy Science*, 29(11), 1964-1966. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.1964>
- Lei, T., Cotter, J. D., Schlader, Z. J., Stannard, S. R., Perry, B. G., Barnes, M. J., & Mündel, T. (2019). On exercise thermoregulation in females: Interaction of endogenous and

- exogenous ovarian hormones. *The Journal of Physiology*, 597(1), 71-88.
<https://doi.org/10.1113/JP276233>
- Leppik, J. A., Aughey, R. J., Medved, I., Fairweather, I., Carey, M. F., & McKenna, M. J. (2004). Prolonged exercise to fatigue in humans impairs skeletal muscle Na⁺-K⁺-ATPase activity, sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ release, and Ca²⁺ uptake. *Journal of applied physiology*, 97(4), 1414-1423. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00964.2003>
- Lindh, I., Skjeldestad, F. E., Gemzell-Danielsson, K., Heikinheimo, O., Hognert, H., Milsom, I., & Lidegaard, Ø. (2017). Contraceptive use in the Nordic countries. *Acta Obstetricia et Gynecologica Scandinavica*, 96(1), 19-28.
<https://doi.org/10.1111/aogs.13055>
- Liu, S. H., al-Shaikh, R., Panossian, V., Yang, R. S., Nelson, S. D., Soleiman, N., Finerman, G. A., & Lane, J. M. (1996). Primary immunolocalization of estrogen and progesterone target cells in the human anterior cruciate ligament. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 14(4), 526-533. <https://doi.org/10.1002/jor.1100140405>
- Logue, D. M., Madigan, S. M., Melin, A., Delahunt, E., Heinen, M., Donnell, S.-J. M., & Corish, C. A. (2020). Low Energy Availability in Athletes 2020: An Updated Narrative Review of Prevalence, Risk, Within-Day Energy Balance, Knowledge, and Impact on Sports Performance. *Nutrients*, 12(3), 835. <https://doi.org/10.3390/nu12030835>
- Longcope, C. (1986). Adrenal and gonadal androgen secretion in normal females. *Clinics in Endocrinology and Metabolism*, 15(2), 213-228. [https://doi.org/10.1016/s0300-595x\(86\)80021-4](https://doi.org/10.1016/s0300-595x(86)80021-4)
- Lopez, L. M., Grimes, D. A., & Schulz, K. F. (2012). Steroidal contraceptives: Effect on carbohydrate metabolism in women without diabetes mellitus. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 4, CD006133.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD006133.pub4>
- Lowe, D. A., Baltgalvis, K. A., & Greising, S. M. (2010). Mechanisms Behind Estrogen's Beneficial Effect on Muscle Strength in Females. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 38(2), 61-67. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e3181d496bc>
- Luine, V. N. (2014). Estradiol and cognitive function: Past, present and future. *Hormones and Behavior*, 66(4), 602-618. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2014.08.011>
- Lundberg, U., Dohns, I. E., Melin, B., Sandsjö, L., Palmerud, G., Kadefors, R., Ekström, M., & Parr, D. (1999). Psychophysiological stress responses, muscle tension, and neck and shoulder pain among supermarket cashiers. *Journal of occupational health psychology*, 4(3), 245-255. <https://doi.org/10.1037//1076-8998.4.3.245>
- Macnutt, M. J., De Souza, M. J., Tomczak, S. E., Homer, J. L., & Sheel, A. W. (2012). Resting and exercise ventilatory chemosensitivity across the menstrual cycle. *Journal of Applied Physiology*, 112(5), 737-747.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00727.2011>
- Mancini, M., & Horak, F. B. (2010). The relevance of clinical balance assessment tools to differentiate balance deficits. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 46(2), 239-248.
- Mannan, S., Begum, N., Begum, S., Ferdousi, S., & Ali, T. (2008). Relationship of Forced Vital Capacity (FVC), Forced Expiratory Volume in First Second (FEV1) and

- FEV1/FVC% with Plasma Progesterone Level during Different Phases of Normal Menstrual Cycle. *Journal of Bangladesh Society of Physiologist*, 2. <https://doi.org/10.3329/jbsp.v2i0.976>
- Martin, D., Sale, C., Cooper, S. B., & Elliott-Sale, K. J. (2018). Period Prevalence and Perceived Side Effects of Hormonal Contraceptive Use and the Menstrual Cycle in Elite Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(7), 926-932. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0330>
- Mateo, M., Blasco-Lafarga, C., Martínez-Navarro, I., Guzmán, J. F., & Zabala, M. (2012). Heart rate variability and pre-competitive anxiety in BMX discipline. *European journal of applied physiology*, 112(1), 113-123. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-1962-8>
- Mazzeo, R. S., Child, A., Butterfield, G. E., Mawson, J. T., Zamudio, S., & Moore, L. G. (1998). Catecholamine response during 12 days of high-altitude exposure (4,300 m) in women. *Journal of Applied Physiology*, 84(4), 1151-1157. <https://doi.org/10.1152/jappl.1998.84.4.1151>
- McClung, J. M., Davis, J. M., Wilson, M. A., Goldsmith, E. C., & Carson, J. A. (2006). Estrogen status and skeletal muscle recovery from disuse atrophy. *Journal of Applied Physiology*, 100(6), 2012-2023. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01583.2005>
- McNulty, K. L., Ansdell, P., Goodall, S., Thomas, K., Elliott-Sale, K. J., Howatson, G., & Hicks, K. M. (2023). The Symptoms Experienced by Naturally Menstruating Women and Oral Contraceptive Pill Users and Their Perceived Effects on Exercise Performance and Recovery Time Posttraining. *Women in Sport and Physical Activity Journal*, 32(1). <https://doi.org/10.1123/wspaj.2023-0016>
- McNulty, K. L., Elliott-Sale, K. J., Dolan, E., Swinton, P. A., Ansdell, P., Goodall, S., Thomas, K., & Hicks, K. M. (2020). The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrheic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1813-1827. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01319-3>
- McNulty, W. H., Gevirtz, R. N., Hubbard, D. R., & Berkoff, G. M. (1994). Needle electromyographic evaluation of trigger point response to a psychological stressor. *Psychophysiology*, 31(3), 313-316. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1994.tb02220.x>
- Meerits, T., Bacchieri, S., Pääsuke, M., Ereline, J., Cicchella, A., & Gapeyeva, H. (2014). Acute effect of static and dynamic stretching on tone and elasticity of hamstring muscle and on vertical jump performance in track-and-field athletes. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis*, 20(0), 48. <https://doi.org/10.12697/akut.2014.20.05>
- Mehl, J., Diermeier, T., Herbst, E., Imhoff, A. B., Stoffels, T., Zantop, T., Petersen, W., & Achtnich, A. (2018). Evidence-based concepts for prevention of knee and ACL injuries. 2017 guidelines of the ligament committee of the German Knee Society (DKG). *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 138(1), 51-61. <https://doi.org/10.1007/s00402-017-2809-5>
- Mense, S., & Gerwin, R. D. (2010). *Muscle Pain: Understanding the Mechanisms*. Springer.

- Metzger, J. M., & Moss, R. L. (1990). Effects of tension and stiffness due to reduced pH in mammalian fast- and slow-twitch skinned skeletal muscle fibres. *The Journal of physiology*, 428, 737-750. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1990.sp018238>
- Michael, H., Härkönen, P. L., Väänänen, H. K., & Hentunen, T. A. (2005). Estrogen and testosterone use different cellular pathways to inhibit osteoclastogenesis and bone resorption. *Journal of Bone and Mineral Research: The Official Journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 20(12), 2224-2232. <https://doi.org/10.1359/JBMR.050803>
- Midgley, A., Jr., & Jaffe, R. B. (1966). Human Luteinizing Hormone in Serum During the Menstrual Cycle: Determination by Radioimmunoassay1. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 26(12), 1375-1381. <https://doi.org/10.1210/jcem-26-12-1375>
- Millet, G. P., & Debevec, T. (2020). CrossTalk proposal: Barometric pressure, independent of PO₂, is the forgotten parameter in altitude physiology and mountain medicine. *The Journal of Physiology*, 598(5), 893-896. <https://doi.org/10.1113/JP278673>
- Millet, G. Y., Lepers, R., Maffiuletti, N. A., Babault, N., Martin, V., & Lattier, G. (2002). Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 92(2), 486-492. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00122.2001>
- Momma, R., Nakata, Y., Sawai, A., Takeda, M., Natsui, H., Mukai, N., & Watanabe, K. (2021). Comparisons of the Prevalence, Severity, and Risk Factors of Dysmenorrhea between Japanese Female Athletes and Non-Athletes in Universities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), 52. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010052>
- Mooney, K., Warner, M., & Stokes, M. (2013). Symmetry and within-session reliability of mechanical properties of biceps brachii muscles in healthy young adult males using the MyotonPRO device. *Working Papers in the Health Sciences*, 1, 1-11.
- Moore, L. G., Niermeyer, S., & Zamudio, S. (1998). Human adaptation to high altitude: Regional and life-cycle perspectives. *American Journal of Physical Anthropology, Suppl* 27, 25-64. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-8644\(1998\)107:27+<25::aid-ajpa3>3.0.co;2-l](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-8644(1998)107:27+<25::aid-ajpa3>3.0.co;2-l)
- Mordecai, K. L., Rubin, L. H., & Maki, P. M. (2008). Effects of menstrual cycle phase and oral contraceptive use on verbal memory. *Hormones and Behavior*, 54(2), 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2008.03.006>
- Moreau, K. L., Hildreth, K. L., Meditz, A. L., Deane, K. D., & Kohrt, W. M. (2012). Endothelial Function Is Impaired across the Stages of the Menopause Transition in Healthy Women. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 97(12), 4692-4700. <https://doi.org/10.1210/jc.2012-2244>
- Mountjoy, M., Ackerman, K. E., Bailey, D. M., Burke, L. M., Constantini, N., Hackney, A. C., Heikura, I. A., Melin, A., Pensgaard, A. M., Stellingwerff, T., Sundgot-Borgen, J. K., Torstveit, M. K., Jacobsen, A. U., Verhagen, E., Budgett, R., Engebretsen, L., & Erdener, U. (2023). 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (REDs). *British Journal of Sports Medicine*, 57(17), 1073-1098. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106994>

- Mountjoy, M., Sundgot-Borgen, J., Burke, L., Ackerman, K. E., Blauwet, C., Constantini, N., Lebrun, C., Lundy, B., Melin, A., Meyer, N., Sherman, R., Tenforde, A. S., Torstveit, M. K., & Budgett, R. (2018). International Olympic Committee (IOC) Consensus Statement on Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S): 2018 Update. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 28(4), 316-331. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0136>
- Mountjoy, M., Sundgot-Borgen, J., Burke, L., Carter, S., Constantini, N., Lebrun, C., Meyer, N., Sherman, R., Steffen, K., Budgett, R., & Ljungqvist, A. (2014). The IOC consensus statement: Beyond the Female Athlete Triad--Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). *British Journal of Sports Medicine*, 48(7), 491-497. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093502>
- Mujika, I., & Taipale, R. S. (2019). Sport Science on Women, Women in Sport Science. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(8), 1013-1014. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2019-0514>
- Munro, M. G., Critchley, H. O. D., Fraser, I. S., & Committee, the F. M. D. (2018). The two FIGO systems for normal and abnormal uterine bleeding symptoms and classification of causes of abnormal uterine bleeding in the reproductive years: 2018 revisions. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 143(3), 393-408. <https://doi.org/10.1002/ijgo.12666>
- Myklebust, G., Engebretsen, L., Braekken, I. H., Skjølberg, A., Olsen, O.-E., & Bahr, R. (2003). Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players: A prospective intervention study over three seasons. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 13(2), 71-78. <https://doi.org/10.1097/00042752-200303000-00002>
- Nagy, H., Carlson, K., & Khan, M. A. (2025). Dysmenorrhea. En *StatPearls*. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560834/>
- Nakayama, T., Suzuki, M., & Ishizuka, N. (1975). Action of progesterone on preoptic thermosensitive neurones. *Nature*, 258(5530), 80. <https://doi.org/10.1038/258080a0>
- Nattiv, A., Loucks, A. B., Manore, M. M., Sanborn, C. F., Sundgot-Borgen, J., Warren, M. P., & American College of Sports Medicine. (2007). American College of Sports Medicine position stand. The female athlete triad. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(10), 1867-1882. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318149f111>
- Netzer, N. C., Rausch, L. K., Frieß, M., Strohl, K. P., Schilz, R., Decker, M., & Pramsohler, S. (2022). Expiratory Peak Flow and Minute Ventilation Are Significantly Increased at High Altitude versus Simulated Altitude in Normobaria. *Life (Basel, Switzerland)*, 12(2), 306. <https://doi.org/10.3390/life12020306>
- Nichols, J. F., Rauh, M. J., Barrack, M. T., Barkai, H.-S., & Pernick, Y. (2007). Disordered eating and menstrual irregularity in high school athletes in lean-build and nonlean-build sports. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 17(4), 364-377. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.17.4.364>
- Nicodemus, K. K., Folsom, A. R., & Anderson, K. E. (2001). Menstrual history and risk of hip fractures in postmenopausal women. The Iowa Women's Health Study. *American Journal of Epidemiology*, 153(3), 251-255. <https://doi.org/10.1093/aje/153.3.251>

- Nordahl, S. H., Aasen, T., Owe, J. O., & Molvaer, O. I. (1998). Effects of hypobaric hypoxia on postural control. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69(6), 590-595.
- Notelovitz, M., Zauner, C., McKenzie, L., Suggs, Y., Fields, C., & Kitchens, C. (1987). The effect of low-dose oral contraceptives on cardiorespiratory function, coagulation, and lipids in exercising young women: A preliminary report. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 156(3), 591-598. [https://doi.org/10.1016/0002-9378\(87\)90059-7](https://doi.org/10.1016/0002-9378(87)90059-7)
- O'Bryan, S. M., Connor, K. R., Drummer, D. J., Lavin, K. M., & Bamman, M. M. (2022). Considerations for Sex-Cognizant Research in Exercise Biology and Medicine. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.903992>
- Oester, C., Norris, D., Scott, D., Pedlar, C., Bruinvels, G., & Lovell, R. (2024). Inconsistencies in the perceived impact of the menstrual cycle on sport performance and in the prevalence of menstrual cycle symptoms: A scoping review of the literature. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 27(6), 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2024.02.012>
- Oian, P., Tollan, A., Fadnes, H. O., Noddeland, H., & Maltau, J. M. (1987). Transcapillary fluid dynamics during the menstrual cycle. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 156(4), 952-955. [https://doi.org/10.1016/0002-9378\(87\)90364-4](https://doi.org/10.1016/0002-9378(87)90364-4)
- Ojedo-Martín, C., Rodríguez-López, E. S., Acevedo-Gómez, M. B., Úbeda-D'Ocasar, E., de-Diego, M. V., & Lara, B. (2024). At What Point in the Menstrual Cycle Are the Pelvic Floor Muscles at Their Weakest? *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 9(3), 135. <https://doi.org/10.3390/jfmk9030135>
- Olson, B. R., Forman, M. R., Lanza, E., McAdam, P. A., Beecher, G., Kimzey, L. M., Campbell, W. S., Raymond, E. G., Brentzel, S. L., & Güttches-Ebeling, B. (1996). Relation between sodium balance and menstrual cycle symptoms in normal women. *Annals of Internal Medicine*, 125(7), 564-567. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-125-7-199610010-00005>
- Oosthuysen, T., & Bosch, A. N. (2010). The effect of the menstrual cycle on exercise metabolism: Implications for exercise performance in eumenorrhoeic women. *Sports Medicine*, 40(3), 207-227. <https://doi.org/10.2165/11317090-000000000-00000>
- Oosthuysen, T., Strauss, J. A., & Hackney, A. C. (2023). Understanding the female athlete: Molecular mechanisms underpinning menstrual phase differences in exercise metabolism. *European Journal of Applied Physiology*, 123(3), 423-450. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05090-3>
- Ortiz-Prado, E., Dunn, J. F., Vasconez, J., Castillo, D., & Viscor, G. (2019). Partial pressure of oxygen in the human body: A general review. *American Journal of Blood Research*, 9(1), 1-14.
- Otis, C. L., Drinkwater, B., Johnson, M., Loucks, A., & Wilmore, J. (1997). American College of Sports Medicine position stand. The Female Athlete Triad. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(5), i-ix. <https://doi.org/10.1097/00005768-199705000-00037>
- Pivarnik, J. M., Marichal, C. J., Spillman, T., & Morrow, J. R. (1992). Menstrual cycle phase affects temperature regulation during endurance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 72(2), 543-548. <https://doi.org/10.1152/jappl.1992.72.2.543>

- Pluess, M., Conrad, A., & Wilhelm, F. H. (2009). Muscle tension in generalized anxiety disorder: A critical review of the literature. *Journal of anxiety disorders*, 23(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2008.03.016>
- Posthuma, B. W., Bass, M. J., Bull, S. B., & Nisker, J. A. (1987). Detecting changes in functional ability in women with premenstrual syndrome. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 156(2), 275-278. [https://doi.org/10.1016/0002-9378\(87\)90267-5](https://doi.org/10.1016/0002-9378(87)90267-5)
- Pożarowski, B., Pawlaczyk, W., Smoter, M., Zarzycki, A., Mroczek, D., Kumorek, M., Witkowski, K., & Adam, K. (2017). Effects of Karate Fights on Achilles Tendon Stiffness Measured by Myotonometry. *Journal of human kinetics*, 56, 93-97. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0026>
- Prabhakar, N. R., & Semenza, G. L. (2012). Adaptive and maladaptive cardiorespiratory responses to continuous and intermittent hypoxia mediated by hypoxia-inducible factors 1 and 2. *Physiological Reviews*, 92(3), 967-1003. <https://doi.org/10.1152/physrev.00030.2011>
- Prado, R. C. R., Willett, H. N., Takito, M. Y., & Hackney, A. C. (2022). Impact of Premenstrual Syndrome Symptoms on Sport Routines in Nonelite Athlete Participants of Summer Olympic Sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(2), 142-147. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0218>
- Pun, M., Guadagni, V., Bettauer, K. M., Drogos, L. L., Aitken, J., Hartmann, S. E., Furian, M., Muralt, L., Lichtblau, M., Bader, P. R., Rawling, J. M., Protzner, A. B., Ulrich, S., Bloch, K. E., Giesbrecht, B., & Poulin, M. J. (2018). Effects on Cognitive Functioning of Acute, Subacute and Repeated Exposures to High Altitude. *Frontiers in Physiology*, 9, 1131. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01131>
- Quatman, C. E., Ford, K. R., Myer, G. D., Paterno, M. V., & Hewett, T. E. (2008). The effects of gender and pubertal status on generalized joint laxity in young athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(3), 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.05.005>
- Quisbert Vargas, M., & Ramírez Flores, D. (2011). Objetivos de la investigación científica. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 10, 461-465.
- Raberin, A., Burtscher, J., Citherlet, T., Manferdelli, G., Krumm, B., Bourdillon, N., Antero, J., Rasica, L., Malatesta, D., Brocherie, F., Burtscher, M., & Millet, G. P. (2024). Women at Altitude: Sex-Related Physiological Responses to Exercise in Hypoxia. *Sports Medicine*, 54(2), 271-287. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01954-6>
- Rae, C., Furlong, W., Horsman, J., Pullenayegum, E., Demers, C., St-Louis, J., Lillicrap, D., & Barr, R. (2013). Bleeding disorders, menorrhagia and iron deficiency: Impacts on health-related quality of life. *Haemophilia: The Official Journal of the World Federation of Hemophilia*, 19(3), 385-391. <https://doi.org/10.1111/hae.12014>
- Rael, B., Alfaro-Magallanes, V. M., Romero-Parra, N., Castro, E. A., Cupeiro, R., Janse de Jonge, X. A. K., Wehrwein, E. A., Peinado, A. B., & IronFEMME Study Group. (2021). Menstrual Cycle Phases Influence on Cardiorespiratory Response to Exercise in Endurance-Trained Females. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030860>
- Ravi, S., Ihalainen, J. K., Taipale-Mikkonen, R. S., Kujala, U. M., Waller, B., Mierlahti, L., Lehto, J., & Valtonen, M. (2021). Self-Reported Restrictive Eating, Eating Disorders,

- Menstrual Dysfunction, and Injuries in Athletes Competing at Different Levels and Sports. *Nutrients*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/nu13093275>
- Rebelo, A. C. S., Zuttin, R. S., Verlengia, R., Cesar, M. de C., de Sá, M. F. S., & da Silva, E. (2010). Effect of low-dose combined oral contraceptive on aerobic capacity and anaerobic threshold level in active and sedentary young women. *Contraception*, 81(4), 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.contraception.2009.11.005>
- Rechichi, C., & Dawson, B. (2009). Effect of oral contraceptive cycle phase on performance in team sport players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(1), 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.10.005>
- Rechichi, C., Dawson, B., & Goodman, C. (2008). Oral Contraceptive Phase Has no Effect on Endurance Test. *International Journal of Sports Medicine*, 29(4), 277-281. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965334>
- Redman, L. M., Scroop, G. C., & Norman, R. J. (2003). Impact of menstrual cycle phase on the exercise status of young, sedentary women. *European Journal of Applied Physiology*, 90(5-6), 505-513. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0889-0>
- Reeder, L. (2024). *The Cure for Women: Dr. Mary Putnam Jacobi and the Challenge to Victorian Medicine That Changed Women's Lives Forever*. St. Martin's Press.
- Regard, M., Oelz, O., Brugger, P., & Landis, T. (1989). Persistent cognitive impairment in climbers after repeated exposure to extreme altitude. *Neurology*, 39(2, Pt 1), 210-213. <https://doi.org/10.1212/WNL.39.2.210>
- Reschechtko, S., Nguyen, T. N., Tsang, M., Giltvedt, K., Kern, M., & Hooshmand, S. (2023). Postural sway is not affected by estrogen fluctuations during the menstrual cycle. *Physiological Reports*, 11(10), e15693. <https://doi.org/10.14814/phy2.15693>
- Richalet, J.-P. (2020). CrossTalk opposing view: Barometric pressure, independent of PO₂, is not the forgotten parameter in altitude physiology and mountain medicine. *The Journal of Physiology*, 598(5), 897-899. <https://doi.org/10.1113/JP279160>
- Richalet, J.-P., Lhuissier, F., & Jean, D. (2020). Ventilatory Response to Hypoxia and Tolerance to High Altitude in Women: Influence of Menstrual Cycle, Oral Contraception, and Menopause. *High Altitude Medicine & Biology*, 21(1), 12-19. <https://doi.org/10.1089/ham.2019.0063>
- Richards, J. S. (2018). The Ovarian Cycle. En *Vitamins and Hormones* (Vol. 107, pp. 1-25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.vh.2018.01.009>
- Rickenlund, A., Carlström, K., Ekblom, B., Brismar, T. B., von Schoultz, B., & Hirschberg, A. L. (2003). Hyperandrogenicity is an alternative mechanism underlying oligomenorrhea or amenorrhea in female athletes and may improve physical performance. *Fertility and Sterility*, 79(4), 947-955. [https://doi.org/10.1016/s0015-0282\(02\)04850-1](https://doi.org/10.1016/s0015-0282(02)04850-1)
- Rickenlund, A., Carlström, K., Ekblom, B., Brismar, T. B., Von Schoultz, B., & Hirschberg, A. L. (2004). Effects of oral contraceptives on body composition and physical performance in female athletes. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 89(9), 4364-4370. <https://doi.org/10.1210/jc.2003-031334>
- Rickenlund, A., Eriksson, M. J., Schenck-Gustafsson, K., & Hirschberg, A. L. (2005). Oral contraceptives improve endothelial function in amenorrheic athletes. *The Journal*

- of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 90(6), 3162-3167.
<https://doi.org/10.1210/jc.2004-1964>
- Righi, I., & Barroso, R. (2022). Do Recreationally-Trained Women of Different Ages Perceive Symptoms of the Menstrual Cycle and Adjust Their Training According to Phases? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113841>
- Rodrigues, S. T., Gotardi, G. C., & Aguiar, S. A. (2017). Effects of Vision on Postural Control in Neurologically Healthy Individuals. En F. A. Barbieri & R. Vítório (Eds.), *Locomotion and Posture in Older Adults: The Role of Aging and Movement Disorders* (pp. 219-236). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48980-3_15
- Romero-Parra, N., Barba-Moreno, L., Rael, B., Alfaro-Magallanes, V. M., Cupeiro, R., Díaz, Á. E., Calderón, F. J., & Peinado, A. B. (2020). Influence of the Menstrual Cycle on Blood Markers of Muscle Damage and Inflammation Following Eccentric Exercise. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1618.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17051618>
- Roney, J. R., & Simmons, Z. L. (2013). Hormonal predictors of sexual motivation in natural menstrual cycles. *Hormones and Behavior*, 63(4), 636-645.
<https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2013.02.013>
- Rosano, G. M., Leonardo, F., Sarrel, P. M., Beale, C. M., De Luca, F., & Collins, P. (1996). Cyclical variation in paroxysmal supraventricular tachycardia in women. *Lancet*, 347(9004), 786-788. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(96\)90867-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(96)90867-3)
- Rosen Vollmar, A. K., Mahalingaiah, S., & Jukic, A. M. (2025). The menstrual cycle as a vital sign: A comprehensive review. *F&S Reviews*, 6(1), 100081.
<https://doi.org/10.1016/j.xfnr.2024.100081>
- Ross, G. T., Odell, W. D., & Rayford, P. L. (1967). Luteinizing Hormone Activity in Plasma during the Menstrual Cycle. *Science*, 155(3770), 1679-1680.
<https://doi.org/10.1126/science.155.3770.1679>
- Rotllan, C., Corbi, F., & Viscor, G. (2024). Muscle Tone, Stiffness, and Elasticity in Elite Female Cyclists after Consecutive Short Competitions. *Translational Sports Medicine*, 2024, 2434494. <https://doi.org/10.1155/2024/2434494>
- Rotllan, C., Hagenaeers, J., Colls, M., & Viscor, G. (2025). The menstrual cycle minimally affects cardiorespiratory function and body balance control in trained women during acute hypobaric hypoxia exposure (4000 m). *European Journal of Applied Physiology*. <https://doi.org/10.1007/s00421-025-05770-w>
- Rotllan, C., & Viscor, G. (2023). Winter Sports Injuries in Elite Female Athletes: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(10), 5815. <https://doi.org/10.3390/ijerph20105815>
- Saei Ghare Naz, M., Rostami Dovom, M., & Ramezani Tehrani, F. (2020). The Menstrual Disturbances in Endocrine Disorders: A Narrative Review. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 18(4), e106694.
<https://doi.org/10.5812/ijem.106694>
- Samsudeen, N., & Rajagopalan, A. (2016). Effect of Different Phases of Menstrual Cycle on Cardio-respiratory Efficiency in Normal, Overweight and Obese Female

- Undergraduate Students. *Journal of Clinical and Diagnostic Research : JCDR*, 10(12), CC01-CC04. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2016/23080.8954>
- Sarrel, P. (1999). The differential effects of oestrogens and progestins on vascular tone. *Human Reproduction Update*, 5(3), 205-209. <https://doi.org/10.1093/humupd/5.3.205>
- Schoene, R. B., Robertson, H. T., Pierson, D. J., & Peterson, A. P. (1981). Respiratory drives and exercise in menstrual cycles of athletic and nonathletic women. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 50(6), 1300-1305. <https://doi.org/10.1152/jappl.1981.50.6.1300>
- Selye, H. (1939). The effect of adaptation to various damaging agents on the female sex organs in the rat. *Endocrinology*, 25(5).
- Sharma, S., & Hashmi, M. F. (2025). Partial Pressure Of Oxygen. En *StatPearls*. StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493219/>
- Sherwin, B. B. (1996). Hormones, mood, and cognitive functioning in postmenopausal women. *Obstetrics and Gynecology*, 87(2 Suppl), 20S-26S. [https://doi.org/10.1016/0029-7844\(95\)00431-9](https://doi.org/10.1016/0029-7844(95)00431-9)
- Shufelt, C. L., Torbati, T., & Dutra, E. (2017). Hypothalamic Amenorrhea and the Long-Term Health Consequences. *Seminars in Reproductive Medicine*, 35(3), 256-262. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1603581>
- Silberstein, S. D., & Merriam, G. R. (2000). Physiology of the menstrual cycle. *Cephalalgia: An International Journal of Headache*, 20(3), 148-154. <https://doi.org/10.1046/j.1468-2982.2000.00034.x>
- Silva, J. C. L. da, Tarassova, O., Ekblom, M. M., Andersson, E., Rönquist, G., & Arndt, A. (2016). Quadriceps and hamstring muscle activity during cycling as measured with intramuscular electromyography. *European journal of applied physiology*, 116(9), 1807-1817. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3428-5>
- Silva, N. L., & Boulant, J. A. (1986). Effects of testosterone, estradiol, and temperature on neurons in preoptic tissue slices. *The American Journal of Physiology*, 250(4 Pt 2), R625-632. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1986.250.4.R625>
- Sims, S. T., & Heather, A. K. (2018). Myths and Methodologies: Reducing scientific design ambiguity in studies comparing sexes and/or menstrual cycle phases. *Experimental Physiology*, 103(10), 1309-1317. <https://doi.org/10.1113/EP086797>
- Singh, M., & Su, C. (2013). Progesterone and neuroprotection. *Hormones and Behavior*, 63(2), 284-290. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2012.06.003>
- Sipilä, S., Finni, T., & Kovanen, V. (2015). Estrogen influences on neuromuscular function in postmenopausal women. *Calcified Tissue International*, 96(3). <https://doi.org/10.1007/s00223-014-9924-x>
- Smekal, G., von Duvillard, S. P., Frigo, P., Tegelhofer, T., Pokan, R., Hofmann, P., Tschan, H., Baron, R., Wonisch, M., Renezeder, K., & Bachl, N. (2007). Menstrual cycle: No effect on exercise cardiorespiratory variables or blood lactate concentration. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(7), 1098-1106. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31805371e7>

- Smith, G. I., Yoshino, J., Reeds, D. N., Bradley, D., Burrows, R. E., Heisey, H. D., Moseley, A. C., & Mittendorfer, B. (2014). Testosterone and progesterone, but not estradiol, stimulate muscle protein synthesis in postmenopausal women. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 99(1), 256-265. <https://doi.org/10.1210/jc.2013-2835>
- Smith, J. R., Brown, K. R., Murphy, J. D., & Harms, C. A. (2015). Does menstrual cycle phase affect lung diffusion capacity during exercise? *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 205, 99-104. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2014.10.014>
- Soares, F. A., Salomoni, S. E., Veneziano, W. H., de Carvalho, J. L. A., Nascimento, F. A. de O., Pires, K. F., & da Rocha, A. F. (2011). On the behavior of surface electromyographic variables during the menstrual cycle. *Physiological Measurement*, 32(5), 543-557. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/32/5/004>
- Solans-Domènech, M., & Saborit, S. (2022). *Eina per incorporar la perspectiva de sexe i gènere en els continguts de recerca*. Agència de Qualitat i Avaluació Sanitàries de Catalunya. Departament de Salut. Generalitat de Catalunya. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:4a3a9461-8ea6-4cf9-a30a-5edf91e933b2>
- Solli, G. S., Sandbakk, S. B., Noordhof, D. A., Ihalainen, J. K., & Sandbakk, Ø. (2020). Changes in Self-Reported Physical Fitness, Performance, and Side Effects Across the Phases of the Menstrual Cycle Among Competitive Endurance Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(9), 1324-1333. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0616>
- Soria-Contreras, D. C., Wang, S., Mitsunami, M., Liu, J., Lawn, R. B., Shifren, J. L., Purdue-Smithe, A. C., Oken, E., & Chavarro, J. E. (2025). Menstrual cycle characteristics across the reproductive lifespan and cognitive function in midlife women. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, S0002-9378(25)00047-X. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2025.01.025>
- Souza, R. A., Beltran, O. A. B., Zapata, D. M., Silva, E., Freitas, W. Z., Junior, R. V., Silva, F. F. da, & Higino, W. P. (2019). Heart rate variability, salivary cortisol and competitive state anxiety responses during pre-competition and pre-training moments. *Biology of sport*, 36(1), 39-46. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2018.78905>
- Stachenfeld, N. S. (2008). Sex Hormone Effects on Body Fluid Regulation. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 36(3), 152. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e31817be928>
- Stachenfeld, N. S., Silva, C., & Keefe, D. L. (2000). Estrogen modifies the temperature effects of progesterone. *Journal of Applied Physiology*, 88(5), 1643-1649. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.5.1643>
- Stafford, D. E. J. (2005). Altered Hypothalamic-Pituitary-Ovarian Axis Function in Young Female Athletes: Implications and Recommendations for Management. *Treatments in Endocrinology*, 4(3), 147-154. <https://doi.org/10.2165/00024677-200504030-00003>
- Stephenson, L. A., & Kolka, M. A. (1999). Esophageal temperature threshold for sweating decreases before ovulation in premenopausal women. *Journal of Applied Physiology*, 86(1), 22-28. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.1.22>

- Stricker, R., Eberhart, R., Chevaillier, M.-C., Quinn, F. A., Bischof, P., & Stricker, R. (2006). Establishment of detailed reference values for luteinizing hormone, follicle stimulating hormone, estradiol, and progesterone during different phases of the menstrual cycle on the Abbott ARCHITECT® analyzer. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, 44(7), 883-887. <https://doi.org/10.1515/CCLM.2006.160>
- Sultan, C., Gaspari, L., & Paris, F. (2012). Adolescent dysmenorrhea. *Endocrine Development*, 22, 171-180. <https://doi.org/10.1159/000331775>
- Tagliapietra, G., Citherlet, T., Raberin, A., Bourdillon, N., Krumm, B., Narang, B. J., Giardini, G., Pialoux, V., Debevec, T., & Millet, G. P. (2024). Effect of menstrual cycle phase on physiological responses in healthy women at rest and during submaximal exercise at high altitude. *Scientific Reports*, 14(1), 27793. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79702-7>
- Taim, B. C., Lye, J., Suppiah, H. T., Chan, T. W., Chia, M., & Clarke, A. (2024). Menstrual cycle characteristics, perceived impact on performance, and barriers to communication: Perspectives of high-performance adolescent athletes in Singapore. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 34(1), e14488. <https://doi.org/10.1111/sms.14488>
- Takase, K., Nishiyasu, T., & Asano, K. (2002). Modulating Effects of the Menstrual Cycle on Cardiorespiratory Responses to Exercise under Acute Hypobaric Hypoxia. *The Japanese Journal of Physiology*, 52(6), 553-560. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.52.553>
- Teede, H. J., Tay, C. T., Laven, J. J. E., Dokras, A., Moran, L. J., Piltonen, T. T., Costello, M. F., Boivin, J., Redman, L. M., Boyle, J. A., Norman, R. J., Mousa, A., Joham, A. E., & the International PCOS Network. (2023). Recommendations from the 2023 international evidence-based guideline for the assessment and management of polycystic ovary syndrome. *European Journal of Endocrinology*, 189(2), G43-G64. <https://doi.org/10.1093/ejendo/lvad096>
- Tenforde, A. S., Kraus, E., Kliethermes, S. A., Fontana, M. A., Barrack, M. T., Dubon, M., Heikura, I. A., Hollander, K., Kroshus, E., Joachim, M. R., Lopes, A. D., Rauh, M. J., Chastain, R., Harrast, M., Heiderscheit, B., Krabak, B. J., Miller, E. M., Napier, C., Roberts, W. O., ... Toresdahl, B. G. (2025). Standardising health history and injury surveillance of participants in endurance events: A modified Delphi consensus statement from the AMSSM runner health consortium. *British Journal of Sports Medicine*, 59(4), 211-221. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-108059>
- Thakrar, D. B., University College Oxford, University of Oxford, High Street, Oxford, OX1 4BH, & United Kingdom. (2024). *Blood Pressure Changes During the Normal Menstrual Cycle in Adolescent Females*. *Svoamr* 2024;2(1):1-7; doi: 10.58624/SVOAMR.2024 .02.009
- Tomomitsu, M. S. V., Alonso, A. C., Morimoto, E., Bobbio, T. G., & Greve, J. M. D. (2013). Static and dynamic postural control in low-vision and normal-vision adults. *Clinics (Sao Paulo, Brazil)*, 68(4), 517-521. [https://doi.org/10.6061/clinics/2013\(04\)13](https://doi.org/10.6061/clinics/2013(04)13)
- Torres, M. J., Kew, K. A., Ryan, T. E., Pennington, E. R., Lin, C.-T., Buddo, K. A., Fix, A. M., Smith, C. A., Gilliam, L. A., Karvinen, S., Lowe, D. A., Spangenburg, E. E., Zeczycki, T. N., Shaikh, S. R., & Neuffer, P. D. (2018). 17β-Estradiol Directly Lowers Mitochondrial Membrane Microviscosity and Improves Bioenergetic Function in

- Skeletal Muscle. *Cell Metabolism*, 27(1), 167-179.e7.
<https://doi.org/10.1016/j.cmet.2017.10.003>
- Torres-Pascual, C., Torrell-Vallespín, S., Mateos-Pedreño, E., & García-Serra, J. (2019). Desarrollo y validación del cuestionario específico de calidad de vida relacionada con la menstruación CVM-22. *Revista Cubana de Obstetricia y Ginecología*, 45(1), 48-59.
- Tracy, E. E. (2017). Contraception: Menarche to Menopause. *Obstetrics and Gynecology Clinics of North America*, 44(2), 143-158.
<https://doi.org/10.1016/j.ogc.2017.02.001>
- Treloar, A. E., Boynton, R. E., Behn, B. G., & Brown, B. W. (1967). Variation of the human menstrual cycle through reproductive life. *International Journal of Fertility*, 12(1 Pt 2), 77-126.
- Tremblay, J. C., & Ainslie, P. N. (2021). Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(18), e2102463118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2102463118>
- Tschakovsky, M. E., & Sherif, D. D. (2004). Immediate exercise hyperemia: Contributions of the muscle pump vs. Rapid vasodilation. *Journal of applied physiology*, 97(2), 739-747. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00185.2004>
- Turnes, T., Possamai, L. T., Penteado Dos Santos, R., de Aguiar, R. A., Ribeiro, G., & Caputo, F. (2020). Mechanical power during an incremental test can be estimated from 2000-m rowing ergometer performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 60(2), 214-219. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.19.09967-5>
- Ulrich, S., Schneider, S. R., & Bloch, K. E. (2017). Effect of hypoxia and hyperoxia on exercise performance in healthy individuals and in patients with pulmonary hypertension: A systematic review. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 123(6), 1657-1670. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00186.2017>
- Vaiksaar, S., Jürimäe, J., Mäestu, J., Purge, P., Kalytko, S., Shakhline, L., & Jürimäe, T. (2011a). No Effect of Menstrual Cycle Phase and Oral Contraceptive Use on Endurance Performance in Rowers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(6), 1571-1578. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181df7fd2>
- Vaiksaar, S., Jürimäe, J., Mäestu, J., Purge, P., Kalytko, S., Shakhline, L., & Jürimäe, T. (2011b). Phase of oral contraceptive cycle and endurance capacity of rowers. *Perceptual and Motor Skills*, 113(3), 764-772.
<https://doi.org/10.2466/05.06.PMS.113.6.764-772>
- van Melick, N., Meddeler, B. M., Hoogeboom, T. J., Nijhuis-van der Sanden, M. W. G., & van Cingel, R. E. H. (2017). How to determine leg dominance: The agreement between self-reported and observed performance in healthy adults. *PloS One*, 12(12), e0189876. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189876>
- Viir, R., Laiho, K., Kramarenko, J., & Mikkelsen, M. (2006). Repeatability of trapezius muscle tone assessment by a myometric method. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 06(02), 215-228.
<https://doi.org/10.1142/S0219519406001856>

- Viitasalo, J. T., Komi, P. V., Jacobs, I., & Karlsson, J. (1982). Effects of prolonged cross-country skiing on neuromuscular performance. *Exercise Sports Biology*, 12, 191-198.
- Vissing, J., & Haller, R. G. (2012). Mechanisms of exertional fatigue in muscle glycogenoses. *Neuromuscular disorders*, 22 Suppl 3, S168-71. <https://doi.org/10.1016/j.nmd.2012.10.011>
- Vogt, S., Roecker, K., Schumacher, Y. O., Pottgiesser, T., Dickhuth, H.-H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2008). Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France. *International journal of sports medicine*, 29(3), 244-250. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965353>
- Wallach, E. E., Diamond, M. P., Wentz, A. C., & Cherrington, A. D. (1988). Alterations in carbohydrate metabolism as they apply to reproductive endocrinology. *Fertility and Sterility*, 50(3), 387-397. [https://doi.org/10.1016/S0015-0282\(16\)60120-6](https://doi.org/10.1016/S0015-0282(16)60120-6)
- Wang, S., Wang, Y.-X., Sandoval-Insausti, H., Farland, L. V., Shifren, J. L., Zhang, D., Manson, J. E., Birmann, B. M., Willett, W. C., Giovannucci, E. L., Missmer, S. A., & Chavarro, J. E. (2022). Menstrual cycle characteristics and incident cancer: A prospective cohort study. *Human Reproduction*, 37(2), 341-351. <https://doi.org/10.1093/humrep/deab251>
- Wang, Y.-X., Arvizu, M., Rich-Edwards, J. W., Stuart, J. J., Manson, J. E., Missmer, S. A., Pan, A., & Chavarro, J. E. (2020). Menstrual cycle regularity and length across the reproductive lifespan and risk of premature mortality: Prospective cohort study. *BMJ*, 371, m3464. <https://doi.org/10.1136/bmj.m3464>
- Wierman, M. E. (2007). Sex steroid effects at target tissues: Mechanisms of action. *Advances in Physiology Education*, 31(1), 26-33. <https://doi.org/10.1152/advan.00086.2006>
- Williams, J. S., Stone, J. C., Masood, Z., Bostad, W., Gibala, M. J., & MacDonald, M. J. (2023). The impact of natural menstrual cycle and oral contraceptive pill phase on substrate oxidation during rest and acute submaximal aerobic exercise. *Journal of Applied Physiology*, 135(3), 642-654. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00111.2023>
- Williams, T. J., & Krahenbuhl, G. S. (1997). Menstrual cycle phase and running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(12), 1609-1618. <https://doi.org/10.1097/00005768-199712000-00010>
- Windhorst, U., & Boorman, G. (1995). Overview: Potential role of segmental motor circuitry in muscle fatigue. *Advances in experimental medicine and biology*, 384, 241-258. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1016-5_19
- Woorons, X., Mollard, P., Lamberto, C., Letournel, M., & Richalet, J.-P. (2005). Effect of Acute Hypoxia on Maximal Exercise in Trained and Sedentary Women: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(1), 147-154. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000150020.25153.34>
- Yamamuro, T., Hama, H., Takeda, T., Shikata, J., & Sanada, H. (1977). Biomechanical and hormonal factors in the etiology of congenital dislocation of the hip joint. *International Orthopaedics*, 1(3), 231-236. <https://doi.org/10.1007/BF00266341>

- Yi, T., & Bae, M. (2021). Prevalence of Premenstrual Syndrome in Korean Female National Athletes and Associated Risk Factors. *The Korean Journal of Sports Medicine*, 39(1), 10-18. <https://doi.org/10.5763/kjms.2021.39.1.10>
- Yim, J., Petrofsky, J., & Lee, H. (2018). Correlation between Mechanical Properties of the Ankle Muscles and Postural Sway during the Menstrual Cycle. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 244(3), 201-207. <https://doi.org/10.1620/tjem.244.201>
- Yoh, K., Ikeda, K., Horie, K., & Inoue, S. (2023). Roles of Estrogen, Estrogen Receptors, and Estrogen-Related Receptors in Skeletal Muscle: Regulation of Mitochondrial Function. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/ijms24031853>
- Yu, O., Christ, J. P., Schulze-Rath, R., Covey, J., Kelley, A., Grafton, J., Cronkite, D., Holden, E., Hilpert, J., Sacher, F., Micks, E., & Reed, S. D. (2023). Incidence, prevalence, and trends in polycystic ovary syndrome diagnosis: A United States population-based study from 2006 to 2019. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 229(1), 39.e1-39.e12. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2023.04.010>

APÈNDIXS

Research Article

Muscle Tone, Stiffness, and Elasticity in Elite Female Cyclists after Consecutive Short Competitions

Cristina Rotllan ¹, Francisco Corbi ², and Ginés Viscor ¹

¹Secció de Fisiologia, Departament de Biologia Cel·lular, Fisiologia i Immunologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain

²Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya, Universitat de Lleida, Lleida, Spain

Correspondence should be addressed to Cristina Rotllan; crrotlls10@alumnes.ub.edu

Received 16 January 2024; Revised 7 March 2024; Accepted 26 March 2024; Published 2 April 2024

Academic Editor: Rita de Cássia Marqueti

Copyright © 2024 Cristina Rotllan et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Background. For professional road cyclists, most overload injuries affect the lower limbs. They are mostly represented by contractures or muscle shortening, characterised by a variation of muscular tone, stiffness, and elasticity. This real-life study aimed to assess specific mechanical parameters in top-class female cyclists who participated in 3 races a week. **Hypothesis.** Muscle tone, stiffness, and elasticity will be affected immediately after competition and at the end of the week due to accumulated fatigue. **Methods.** Six professional cyclists were evaluated. This pilot study consisted of a controlled trial and three days of competition, with rest days between them. MyotonPRO was used to measure tone, stiffness, and elasticity in six leg muscles: vastus lateralis (VL), vastus medialis (VM), rectus femoris (RF), biceps femoris (BF), lateral gastrocnemius (LG), and medial gastrocnemius (MG). Daily basal and pre- and postrace measures were carried through to the 3 races in a week. **Results.** The muscular tone of VL, VM, LG, and MG and the stiffness of VL, VM, RF, BF, LG, and MG decreased after races. VL and RF were mostly affected by ($p = 0.05$) and ($p = 0.009$), respectively. Basal elasticity improved over time until the last day. **Conclusions.** Muscle tone and stiffness decreased after a very intense and exhausting cycling endurance competition. Basal elasticity improved immediately after the race and continued this trend until the end of the week. More research is needed on changes in mechanical properties in competition and risk prevention of injuries.

1. Introduction

Several studies have examined the most common injuries in amateurs [1–4], where the incidence of overtraining injuries can reach 85% [4]. However, only four epidemiological studies, all retrospective, have focused on studying male professional cyclists [5–8]. Regrettably, the definition of injury, severity, and specificity of the diagnosis were different among them.

However, no epidemiological study has observed how competition affects professional female cyclists. Female representation in research in exercise and sports medicine is limited; only 39% of the participants in studies published for 3 years in relevant journals were women [9]. In addition, gender-dependent differences in the probability of suffering

certain injuries have been found; for that reason, it is necessary to include more women in the study samples [4].

Professional cyclists have a high risk of traumatic and overuse injuries (0.5 per year/cyclist), considering both traumatic and overuse injuries [6]. This means that at least one in two cyclists is exposed to an injury each season, which is considered a high risk of injury.

Regarding overuse injuries, patellar and achilles tendinitis seem to be the most common injuries. In addition, the rate of overuse injuries affecting the knee was 62% of all overuse injuries [5].

Later, a study exclusively describing overuse injuries in 109 cyclists from 7 professional teams throughout a season reported how lumbar and knee pain were the most commonly reported injuries, with 58% and 36%, respectively.

Unfortunately, no specific clinical diagnosis was established [7], and various injuries, such as muscle contractions and shortening, are only considered when they limit the ability to train and compete [10].

De Bernardo and colleagues observed how, of the 112 injuries suffered by 51 professional road cyclists over 4 years, 51.5% were overtraining and 26.4% were overuse injuries located in the muscles, causing these chronic muscle contractions and shortenings and mainly affecting the gastrocnemius and quadriceps [6].

Contractures are the most common injuries between muscle overload injuries and are persistent, painful, and involuntary contractions of one or more muscles, which represent a defensive reaction when the muscle is under stress [11]. From a microscopic point of view, when a muscle is under contraction, sliding of the actin and myosin filaments can be seen; however, this is not preceded by activation of the neuromuscular junction. For this reason, contractures can sometimes also be called in other ways, and it is considered that they may have a multifactorial cause [12]. For example, an intracellular Ca^{2+} build-up will cause more active cross-bridges, as well as the action of chemical agents such as high doses of caffeine [12].

Many international road cycling competitions consist of consecutive daily races, meaning it requires a quick and satisfactory recovery between days to reach maximum performance during competition [13].

On the other hand, there is a relationship between overuse injuries, fatigue, and altered muscle tone. People with contractures feel an involuntary increase in muscle tone and a decrease in elasticity, which seems to limit their range of motion [11, 14]. Muscle tone is commonly defined as tension at rest, clinically determined as resistance to passive movement [15], and can be evaluated, in superficial muscles, by tensiomyography [16, 17] and myotonometry tools [18]. MyotonPRO® is an easy-to-use, lightweight, noninvasive device outside the laboratory employed in this study. Another method such as tensiomyography also assesses muscle properties noninvasively.

These instruments allow to record viscoelastic properties of muscle tissue that are not constant but depend on previous movements, where the viscoelastic tone is a typical expression of the thixotropic nature of muscles and myofascia [19]. The relationship between muscle contractures and injuries has been observed in different studies, along with increased muscle stiffness, which can cause the onset of more serious damage and pain, particularly after intense training [20] or after international consecutive daily races.

Furthermore, many studies have attempted to assess the mechanical response of the muscle, the risk of injury in athletes, and how these properties vary depending on physical exercise [21–23]. The relationship that has been observed between muscle tone, elasticity, and muscle stiffness with contractures can help in the early detection of these or even in the prevention of more serious injuries that involve functional incapacity or stoppage of the competition. In this study, we hypothesize that accumulated fatigue during a cycling competition could modify muscle

properties. Considering that the muscle groups most affected in cycling are those of the legs and taking also into account that the variation in muscle tone, stiffness, and elasticity could influence a higher incidence of muscle contractures, the main objective of this pilot study was to analyse, in professional cyclist women, how muscle properties are affected by the completion of a 5-day stage competition.

2. Materials and Methods

2.1. Participants. A group of six professional female cyclists from one of the UCI World Tour teams, the highest international women's category, took part in this study.

The inclusion criteria were to be part of one of the participating teams and have at least one year of cycling experience. The exclusion criteria were to finish the competition with some type of muscle or joint discomfort and have some injury or muscle ailment before the competition.

Anthropometric measurements and years of cycling experience were collected (Table 1). None of the participants took hormonal contraceptives. The study was designed following the standards of the Bioethics Committee of the University of Barcelona and in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki of 1975, revised in 2008.

2.2. Noninvasive Muscle Properties. MyotonPRO® (Myoton Ltd., Estonia) was used to assess muscle tone, muscle elasticity, and stiffness. MyotonPRO® is a noninvasive, portable, easy-to-use, and relatively inexpensive device, which is used for prevention, detection of the risk of injury, and monitoring in rehabilitation processes. These characteristics allow it to be used in many environments, including in competitions and outside of a laboratory [18, 24].

The device was configured with a preload of 0.18 N. The device was placed perpendicular to the belly of the muscle to be evaluated, with a precompression of the subcutaneous tissue performed independently of the subject taking the measurements (Figure 1). The device delivered a brief (15 ms) low mechanical impulse (0.4 N) followed by a rapid rest and release of the applied force [21]. This impulse causes an elastic deformation in the muscle tissue that shows oscillations that are recorded and saved by the device.

During the test, the following parameters are obtained simultaneously: (a) frequency of oscillation (Hz) which indicates the muscle tone or intrinsic tension of a muscle, (b) muscle stiffness (N/m) which is the muscle's ability to resist an external force or its contraction, which modifies its shape [25]; logarithmic decrement (log D) which describes the muscle elasticity, namely, the ability to recover its shape after being deformed or after its contraction [24].

2.3. Study Design. The participants competed in 3 cycling races in a week: La Vuelta a Navarra (2 stages with a day of rest interspersed between the two stages) and the one-day race Donostiako Klasikoa, with a day of rest between the two competitions. The first race of la Vuelta a Navarra was

TABLE 1: Anthropometric description and competition experience.

Variables	Mean ± SD (n = 6)	Min-Max
Age, years	25.0 ± 5.6	19.0–35.0
Weight, kg	57.7 ± 5.1	51.0–64.0
Height, cm	166.8 ± 4.0	159.0–170.0
BMI	20.7 ± 1.7	17.9–22.2
Competition experience, years	8.9 ± 9.8	1.5–28.0

BMI = body mass index, SD = standard deviation.

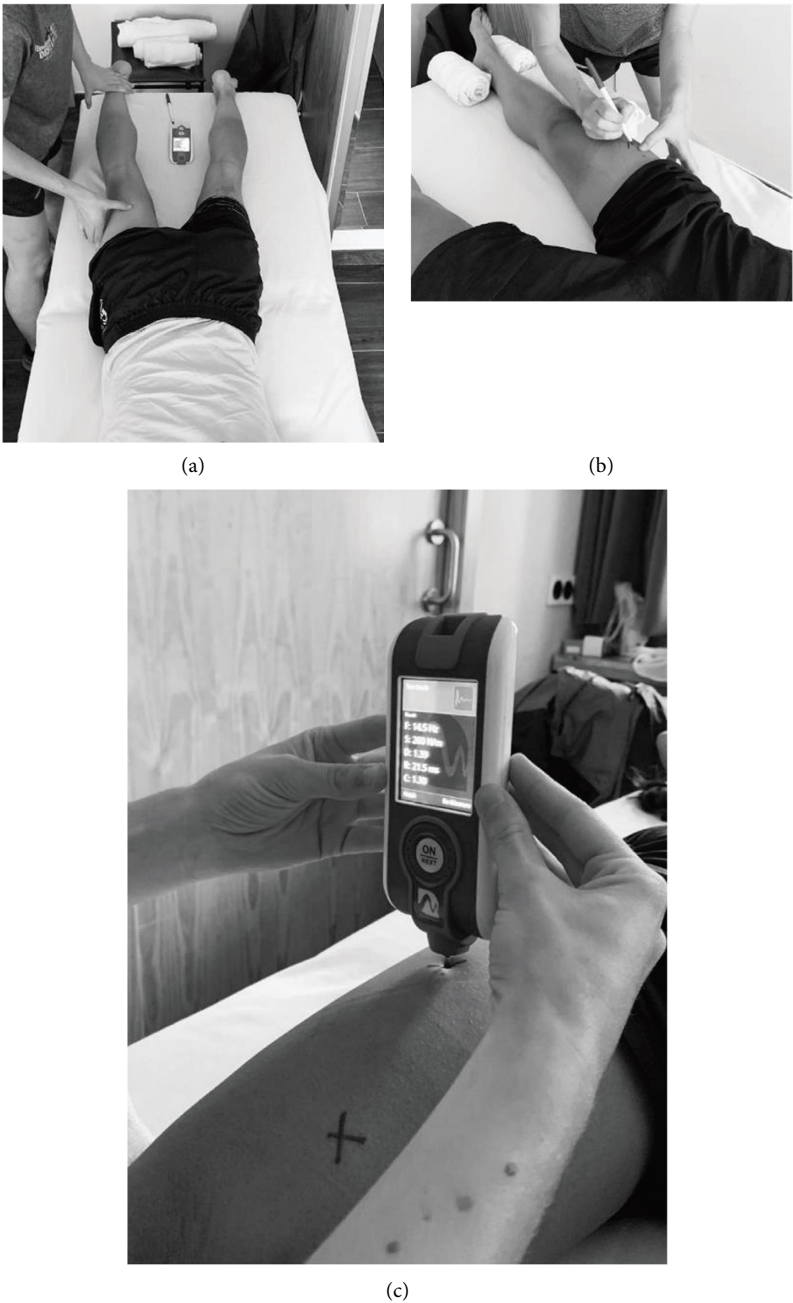


FIGURE 1: Technique and measurement position of MyotonPRO® exploration. (a) Identification of measurement location by isometric contraction (b) marking the measurement point with a permanent marker (c) measurement point with Myoton PRO®.

108 km in distance and had 2.297 m of elevation gain; the second race was 120,7 km in distance and 1.321 m in elevation gain. And the last, Donostiako Klasikoa race was, 126,7 km in distance and 2.693,3 m elevation gain.

This repeated measure study design consisted of a familiarization phase, pre- and postcompetition measurements and baseline evaluations from the first to the fifth day of the international cycling competition week (Table 2).

The familiarization phase (FP) was carried out in the first competition of the three stages that the cyclists participated in for 5 consecutive days. During the FP, it was possible to assess the intrinsic characteristics of participating in a professional category cyclist race (place and environment where the measurements were taken, the time needed to perform them, and the transfer time from the start point to the finish point of the race) and to observe the possible unexpected events or aspects beyond our control (climate, traffic incidents, or road closures).

During the two subsequent competition days (C1 and C2) measurements were taken, a maximum of 40 minutes, before and after the races (pre- and postcompetition data).

2.4. Recording of Muscle Properties. The muscles studied were m. vastus lateralis (VL), m. vastus medialis (VM), m. rectus femoris (RF), m. biceps femoris (BF), m. lateral gastrocnemius (LG), and m. medial gastrocnemius (MG) of the dominant lower limb of the athletes. We identified the dominant leg by asking "If you should shoot the ball on a target, which leg would you use to shoot the ball," which has been reported to be accurate for symmetrical sports [26].

Figure 1 shows how the samples were taken with cyclists lying on the stretcher in the supine position for the VL, VM, and RF muscles and in the prone position for the BF, LG, and MG muscles. To maintain the posture of the leg in a neutral position, rolled towels were used on each side of the tibial malleolus and on the external part of the limb to be studied in supine decubitus and prone decubitus with the foot out of the stretcher. In the first assessment of the week, the measurement points were marked with a permanent marker. The muscles to be studied had previously been positioned by asking for an isometric contraction, and the evaluation points were selected considering the SENIAM recommendations [27–29]. Furthermore, baseline assessments were performed for 5 days, after getting up and before breakfast.

Table 3 shows the averages and maximum values of heart rate (HR) and watts of power (W) for the 3 cycling races. These values indicate that the subjects performed a high-intensity exercise and that they are elite athletes.

2.5. Statistical Analysis. The open-source statistical program JASP 0.10.2 was used for the statistical analysis. A descriptive analysis of the variations in muscle tone, muscle stiffness, and elasticity was carried out. Mean values and standard deviations (SD) were calculated for results that had a normal distribution. For data showing a deviation from normality, the median is considered. The Shapiro–Wilk test was used to observe whether the normality criteria were met ($P < 0.05$). The Student's *t*-test and Wilcoxon test were used to compare

TABLE 2: Study design.

FP	R1	C1	R2	C2
Basal	Basal	Basal	Basal	Basal
Pre		Pre		Pre
Post		Post		Post

FP = familiarization phase, R1/R2 = rest day 1/rest day 2, C1/C2 = Competition 1/competition 2.

TABLE 3: HR, power output and km ($n = 6$).

Parameters	FP (108 km)	C1 (120,7 km)	C2 (126,7 km)
HR (bpm)	167	159	168
HR max (bpm)	194	193	192
Power output (W)	185	157	183
Power output max (W)	731	696	637

Heart rate = heart rate, bpm = beat per minute, W = watts, FP = familiarization phase, C1 = competition 1, C2 = competition 2.

pre- and postcompetition situations (C1 and C2) and baselines on day 1 and day 5, in the six muscles studied (VL, VM, RF, BF, LG, and MG). The parameters included were dependent variables (muscle tone, stiffness, and elasticity), and the subject factors were the six muscles of the six cyclists. Large effects of muscle tone and stiffness were found in pre- and postcompetition 1 and 2 and also of elasticity in the basal situation, whereas negligible effect size of muscle tone and stiffness were seen in the basal situation. Effect sizes were provided by calculating the Rang-Biserial Correlation (Rank-Biserial Correlation r_B).

3. Results

3.1. Muscle Properties before and after Competition (C1/C2). Our data show how tone and stiffness decrease significantly ($p < 0.001$) after the two competitions and muscle elasticity improves once the competitions are over ($p < 0.001$).

It is worth noting the tendency, although not always significant, of all muscles to decrease muscle tone post-competition. In terms of muscle stiffness and a similar evolution of muscle tone, the results showed that all assessed muscles independently decreased muscle stiffness significantly after races. Elasticity tended to increase, decreasing its logarithmic values after competition (Figure 2).

The VL muscle was the only one to undergo significant changes in the three variables to be studied. Its tone was significantly decreased in the postcompetition measurements compared to the precompetition values, in both competitions. Therefore, after C1 dropped from precompetition 15.43 to postcompetition 14.57 ($p = 0.031$), as well as after C2 from precompetition values 14.78 ± 1.52 to postcompetition 14.10 ± 1.14 ($p = 0.043$). The muscle stiffness of the VL also obtained a significant decrease in C1 ($p = 0.009$), from initial values of 275.50 ± 22.13 to final values of 255.90 ± 20.27 , and the logarithmic value was reduced in C1, which means that the VL improved its elasticity ($p = 0.023$).

RF was the only muscle that improved its initial elasticity after both races, decreasing from the beginning of C1 (1.40 ± 0.25) to a lower value at the end (1.21 ± 0.15)

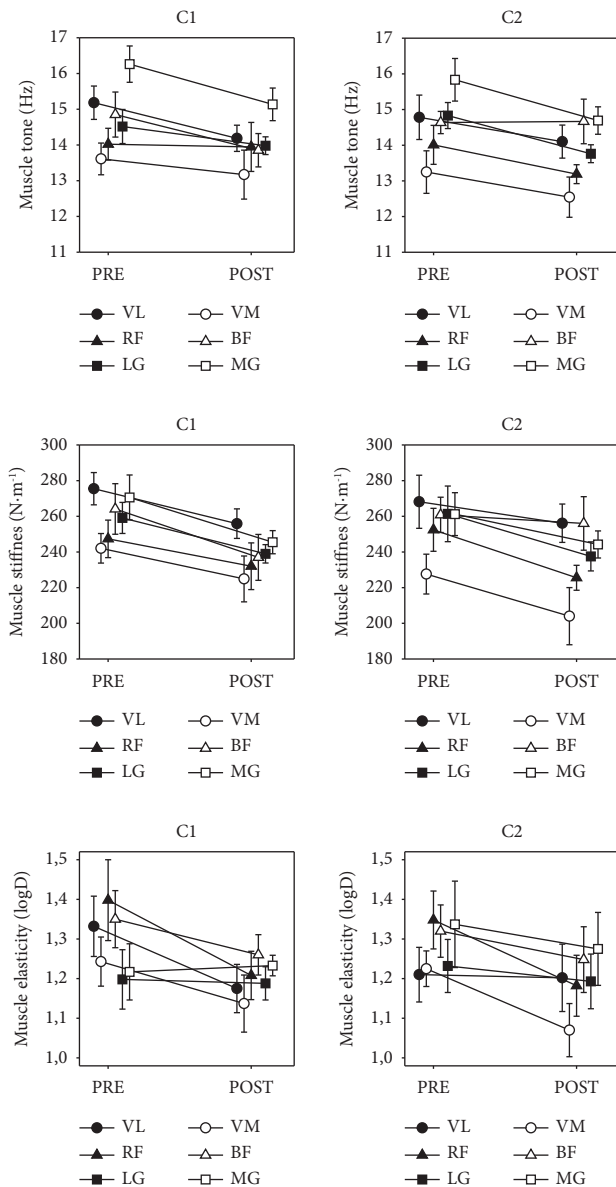


FIGURE 2: Changes of muscle tone, stiffness, and elasticity before and after competition 1 and competition 2 of 6 muscles.

($p = 0.015$) and also dropping from the start of C2 (1.35 ± 0.18) to about 15% (1.18 ± 0.19) after the race ($p = 0.010$).

The other muscles MG, LG, BF, and VM also underwent significant modifications to the parameters studied after the competitions, following the same general trend (Table 4).

3.2. Muscle Basal Properties. The measurements of the muscle properties were taken throughout the 5 days of competitive concentration, before breakfast, and the values of day 1 were compared with day 5 (Table 5).

The results showed that muscle tone during competition week has individual tendencies concerning the muscles and with various oscillations throughout the week depending on whether it was a competition day or a rest

day. However, no significant results were found in any muscle when comparing the values of the first day with those of the fifth.

The RF is the only muscle that progressively increased its stiffness throughout the week and ended the last day (262.13 ± 23.11) with a significantly higher value ($p = 0.032$) compared to the first day (242.97 ± 27.47) (Figure 3).

Elasticity increased significantly throughout the week ($p = 0.011$), regardless of muscle, with a median on day 1 of 1.37 and on day 5 of 1.29.

The VL muscle improved its elasticity ($p = 0.020$), decreasing the logarithmic value with a downward trend from the first day (1.47 ± 0.20) to the fifth (1.19 ± 0.20) (Figure 4).

4. Discussion

Previous studies used MyotonPRO® as a monitoring tool to prevent injuries and improve performance in sports [22, 23]. However, to our knowledge, there is no other study conducted on professional cyclists that evaluates muscle properties immediately before and after a 5-day race of competition.

The results presented in this study show a decrease in muscle tone, stiffness, and logarithmic decrement immediately after finishing the race compared to levels before the race, which confirms the effect that competition has on the muscles involved in pedalling (Figure 2). Although more studies are needed, it seems like a decrease in tone and stiffness postexercise can be caused by at least 2 different causes: (a) a stress factor before and during competition [30, 31] and (b) postcompetition neuromuscular fatigue [17, 32].

According to several studies, muscle tone is affected by what is called muscle tension [19]. At turn, muscle tension depends on psychological factors, such as stress or anxiety related to an increase in muscle activity. Based on a critical review of the literature on muscle tension and generalized anxiety disorder, there are different proposals. One of them is the excessive concern that can lead to maintaining certain postures and static tension in the muscles for a long time. An example known to many people is the experience of feeling tense muscles after an activity that requires high levels of concentration and cognitive effort, such as an academic exam. To objectify this hypothesis, some researchers propose measuring muscle tension with EMG while subjects watch recordings with worrying or distressing content [33]. Other authors have demonstrated the association between work stress and muscle tension [34, 35]. Chronic myofascial pain, the so-called trigger points responsible for muscle pain, has also been observed to show higher EMG activity during a mental stress situation than in a control one [36].

Several studies reinforce the idea that competitive states lead to stressful conditions, as in the case of our study.

Profuse scientific evidence is available on the relationship between heart rate variability (HRV) and anxiety in precompetition situations [31, 37, 38]. In a recent study, hemodynamic parameters and heart rate variability (HRV) were studied in a group of cyclists. HRV data were collected 5 days before a competition and reassessed before the start of

TABLE 4: Muscle tone, stiffness, and elasticity of the 6 muscles before and after competition 1 and competition 2 ($n = 6$).

	C1		C2	
	PRE	POST	PRE	POST
VL				
Tone (Hz)	15.43 [13.57–16.45]	14.57 [12.84–15.07] *	14.78 ± 1.52	14.10 ± 1.14 *
Stiffness (N/m)	275.50 ± 22.13	255.90 ± 20.27 *	268.17 ± 36.44	256.13 ± 26.34
Elasticity (log D)	1.33 ± 0.18	1.18 ± 0.15 *	1.21 ± 0.17	1.20 ± 0.21
VM				
Tone (Hz)	13.61 ± 1.09	13.17 ± 1.68	13.25 ± 1.46	12.54 ± 1.38 *
Stiffness (N/m)	242.07 ± 20.29	224.90 ± 31.53	223.10 [191.40–274.40]	200.40 [144.60–261.20] *
Elasticity (log D)	1.24 ± 0.15	1.14 ± 0.18	1.17 [1.14–1.41]	1.05 [0.84–1.29] *
RF				
Tone (Hz)	14.02 ± 1.11	13.95 ± 1.58	14.01 ± 1.34	13.19 ± 0.65
Stiffness (N/m)	247.37 ± 25.72	232.00 ± 32.11	252.43 ± 29.50	225.53 ± 17.13 *
Elasticity (log D)	1.40 ± 0.25	1.21 ± 0.15 *	1.35 ± 0.18	1.18 ± 0.19 *
BF				
Tone (Hz)	14.85 ± 1.54	13.85 ± 1.14	14.64 ± 0.77	14.67 ± 1.53
Stiffness (N/m)	264.13 ± 34.74	236.97 ± 31.57 *	260.83 ± 24.25	256.03 ± 36.76
Elasticity (log D)	1.35 ± 0.18	1.26 ± 0.13	1.32 ± 0.16	1.25 ± 0.20
LG				
Tone (Hz)	14.52 ± 1.17	13.98 ± 0.61	14.83 ± 0.90	13.76 ± 0.62 *
Stiffness (N/m)	259.10 ± 21.33	239.00 ± 12.61 *	261.40 ± 38.20	237.53 ± 20.01
Elasticity (log D)	1.20 ± 0.18	1.19 ± 0.10	1.23 ± 0.16	1.19 ± 0.17
MG				
Tone (Hz)	16.26 ± 1.24	15.14 ± 1.12 *	15.84 ± 1.46	14.69 ± 0.94
Stiffness (N/m)	270.60 ± 15.88	245.50 ± 15.88 *	261.23 ± 29.47	244.23 ± 18.62
Elasticity (log D)	1.23 ± 0.06	1.23 ± 0.06	1.34 ± 0.27	1.28 ± 0.22

Data are expressed as mean ± SD except for cases where the Shapiro-Wilk test failed to demonstrate a normal distribution of the data, in such cases the median and ranges are presented * $P \leq 0.05$. VL = m. vastus lateralis, VM = m. vastus medialis, RF = m. rectus femoris, BF = m. biceps femoris, LG = m. lateral gastrocnemius, MG = m. medial gastrocnemius, C1 = competition 1, C2 = competition 2.

TABLE 5: Muscle tone, stiffness, and elasticity of the 6 muscles during 5 days of competition week ($n = 6$).

	FP	R1	C1	R2	C2
VL					
Tone (Hz)	14.84 ± 1.38	14.46 ± 0.80	14.86 ± 1.35	14.46 ± 1.11	15.06 ± 1.12
Stiffness (N/m)	272.97 ± 21.84	265.80 ± 15.19	275.13 ± 25.21	263.40 ± 27.76	272.47 ± 27.90
Elasticity (log D)	1.47 ± 0.20	1.40 ± 0.17	1.42 ± 0.24	1.34 ± 0.19	1.19 ± 0.20 *
VM					
Tone (Hz)	13.68 ± 1.36	13.34 ± 1.03	13.54 ± 1.17	13.42 ± 1.11	13.16 ± 0.91
Stiffness (N/m)	234.20 ± 25.23	239.90 ± 23.13	241.80 ± 22.22	235.27 ± 17.93	234.27 ± 20.06
Elasticity (log D)	1.35 ± 0.12	1.39 ± 0.20	1.38 ± 0.16	1.36 ± 0.15	1.29 ± 0.20
RF					
Tone (Hz)	14.07 ± 1.34	13.99 ± 1.11	13.86 ± 0.94	13.92 ± 1.09	14.12 ± 0.97
Stiffness (N/m)	242.97 ± 27.47	242.87 ± 24.42	247.27 ± 17.99	245.50 ± 14.84	262.13 ± 23.11 *
Elasticity (log D)	1.43 ± 0.18	1.42 ± 0.15	1.49 ± 0.17	1.44 ± 0.16	1.51 ± 0.26
BF					
Tone (Hz)	14.30 ± 0.98	14.18 ± 1.19	14.02 ± 0.88	14.17 ± 1.10	13.98 ± 0.90
Stiffness (N/m)	248.30 ± 22.16	249.77 ± 31.92	250.00 ± 22.20	246.03 ± 33.12	249.27 ± 28.23
Elasticity (log D)	1.37 ± 0.21	1.37 ± 0.15	1.31 ± 0.18	1.30 ± 0.20	1.33 ± 0.21
LG					
Tone (Hz)	14.08 ± 0.62	14.27 ± 1.08	14.79 ± 0.95	14.62 ± 0.95	14.36 ± 0.44
Stiffness (N/m)	246.37 ± 13.91	242.83 ± 14.21	249.40 ± 17.65	245.67 ± 17.67	245.87 ± 12.50
Elasticity (log D)	1.34 ± 0.16	1.21 ± 0.14	1.25 ± 0.16	1.26 ± 0.17	1.26 ± 0.19
MG					
Tone (Hz)	14.75 ± 0.82	15.70 ± 1.09	15.75 ± 0.93	15.66 ± 1.09	14.90 ± 0.88
Stiffness (N/m)	244.37 ± 14.40	248.40 ± 17.35	249.93 ± 13.03	245.27 ± 20.89	240.20 ± 16.28
Elasticity (log D)	1.47 ± 0.12	1.34 ± 0.12	1.38 ± 0.17	1.38 ± 0.20	1.35 ± 0.22

Values are mean ± SD, * $P \leq 0.05$ compared to day 1. VL = m. vastus lateralis, VM = m. vastus medialis, RF = m. rectus femoris, BF = m. biceps femoris, LG = m. lateral gastrocnemius, MG = m. medial gastrocnemius.

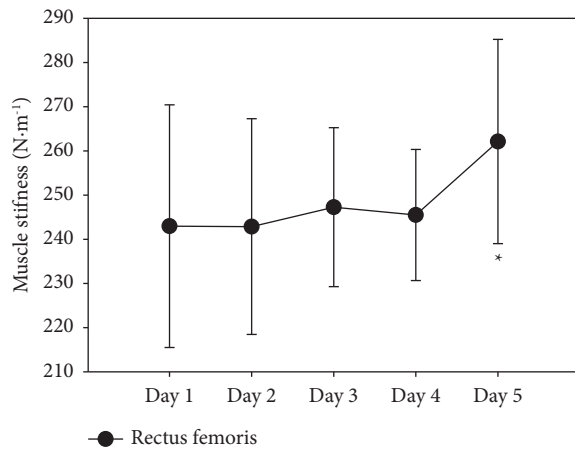


FIGURE 3: Changes of m. rectus femoris stiffness from day 1 to day 5.

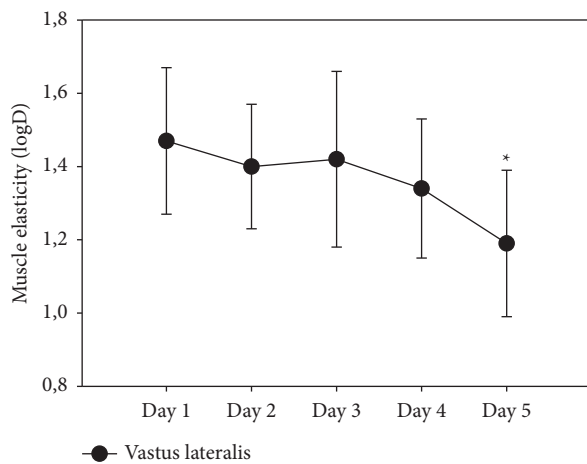


FIGURE 4: Changes of m. vastus lateralis elasticity from day 1 to day 5.

the race, also applying the scale called the “Competitive State Anxiety Inventory-2” (CSAI-2), which is known to be effective in the assessment of anxiety in sports [39]. The results confirmed that cycling competition is a stressful situation capable of altering autonomic nervous control of hemodynamic parameters. Significant changes in HRV are accompanied by alterations in precompetitive anxiety measured before a bicycle motocross (BMX) competition [31], and similar results were found in other disciplines such as swimming [37].

Although stress in a competitive situation is well known, more studies are needed to compare the different competitive moments and how they affect stress, as well as the relationship between stress and muscle mechanical properties.

Another aspect that can affect muscle tone and stiffness after intense exercise is neuromuscular fatigue.

The results of this study demonstrate the decrease in muscle tone and stiffness, in different muscles, after the competition (Table 4), suggesting that the intensity of effort, muscle fatigue, dehydration, changes in skin temperature, and alteration of skin conductivity are some of the possible causes that can justify this behaviour [17].

In many studies, muscle fatigue has been assessed with static monitoring, measuring substrates, metabolites, or other chemicals using biochemical techniques, such as lactate, creatine phosphokinase, hormones, or EMG. Our data agree with previous studies that have used tensiomyography (TMG) to examine the relationship between long-distance running and neuromuscular fatigue, by assessing muscle fatigue after an ultratriathlon in Lanzarote [17]. In this study, significant differences ($p = 0.006$) were found in the increase in maximum radial displacement or muscle belly deformation, which represents a loss of muscle stiffness of the biceps femoris muscle, after sport, and the same downward trend of the rectus femoris. These results support our findings, where the stiffness of RF decreased in C2 ($P = 0.009$) and BF in C1 ($P = 0.03$) (Table 4). It should be noted that in this study, the authors took the pre-competition measurements the day before the race, unlike our study, eliminating the possible precompetition stress factor, and hypothetically, the significance would be greater.

Several studies have linked high muscle deformation values with a lack of muscle mass or significant muscle fatigue [40, 41].

In our study, muscle stiffness was reduced in the VL, RF, BF, LG, and MG muscles (Table 4). These results agree with those found by Viitasalo et al. [42], who observed a decrease of 30–35% of the integrated EMG activity of m. vastus lateralis and m. vastus medialis during a maximal isometric contraction, after an 85 km cross-country skiing race, and with St Clair Gibson et al. [43], who examined neuromuscular activity during 100 km of cycling with high-intensity intervals between 1 and 4 km., where power output, EMG measurements, and muscle glycogen were analysed. Unexpectedly, EMG activity decreased in parallel with a reduction in power output, and this phenomenon augmented with time, until the 100 km was completed [43].

In another study with ultramarathon runners, after a 65 km race [44], maximal voluntary contraction (MVC) and neuromuscular fatigue of the knee extensor and plantar flexor muscles were tested, a significant decrease in MVC ($p = 0.005$), mainly because the maximum voluntary activation decreased ($p = 0.001$) in the knee extensor muscles. The decrease in MVC after activity would match the results of our study. In addition, clear damage to muscle fibres has been observed after long-distance competitions, where the exercise was strenuous [45]. Opposite results were found after strength training, where muscle parameters increased after training [46, 47].

Other factors can also explain how fatigue causes a decrease in muscle mechanical response [32, 48, 49]. Probably, the most important factors are the accumulation of H^+ and inorganic phosphate, a limitation of the release of Ca^{2+} from the sarcoplasmic reticulum [32], a reduction of the sensitivity of myofibrils to Ca^{2+} , and a decrease in the number of cross-bridges [50, 51].

Another possible cause of fatigue is the decrease in neural inputs since it has been observed that, in prolonged exercises, there is a reduction in corticospinal impulses that affect motor neurons [52]. Furthermore, the high oxidation of fatty acids after long-term exercise suggests that free

tryptophan in the brain could contribute to this reduced activation [53]. On the one hand, free tryptophan is a precursor to serotonin, and on the other, increased serotonergic activity can induce fatigue by inhibiting the dopaminergic system. Modifications of the oxidative substrate may have led to a decrease in corticospinal impulses [44].

Changes in cortical excitability, such as modification of afferents from the muscle spindle, can reduce the stretch reflex produced by intense cyclic stretching-shortening exercises [54], specifically affecting the intrafusal fibres, and the viscoelastic properties of the muscle. Furthermore, the effects of muscle fatigue on the responsiveness of the Golgi tendon organ and its influence on the alpha motor neuron are not entirely clear [55].

The third parameter observed is elasticity, characterised by the logarithmic decrease in the oscillations performed by MyotonPRO® in the tissue. It describes the dissipation or loss of mechanical energy when the tissue recovers its shape after deformation. The results of our study show that in the VL muscle, the value after the race is lower than before starting and improves elasticity independently of the muscles throughout the week (Figure 4). The lower the logarithmic value, the less energy is needed to modify the tissue, and the more elastic this muscle is [56].

Our study showed significant results of increased elasticity of RF in C1 ($p = 0.015$) and C2 ($P = 0.010$). The VL increased its elasticity in C1 ($p = 0.023$) and the VM in C2 ($p = 0.036$) (Table 4).

A previous study showed an almost significant increase in elasticity over 7 days of elite male cycling competition in the RF and BF muscles [21]. The authors justified this tendency as an effect of the plausible expression of tone and stiffness. These results can be understood by the relationship between these two muscles. RF and BF, as two antagonistic muscle groups (BF causes knee flexion and RF extension), are involved in opposite movements around the same joint, which could alter.

A very important factor for an athlete, which participates in his ability, is the recovery index of the muscle working capacity, the relaxation phase [57]. From the point of view of biomechanics, an elastic muscle should recover its initial shape more efficiently. Energy is needed to overcome the resistance to the viscoelastic properties of the antagonist and the contracting muscle [58, 59]. Elastic energy is stored in the muscle during a muscle shortening-stretching cycle to be used in a dynamic movement [60]. One could speculate that the more elastic a muscle is, the less energy is lost in contraction or stretching during the relaxation of the antagonist. Here, we found a tendency for the VL and RF muscles to decrease tone and stiffness after competition, being one of the most activated muscles in cycling [61, 62]. The variability of the competition itself is also a key factor that can affect the muscles differently, depending on whether the stage of the race involves mountain passes or takes place on flat terrain, namely, the standing or sitting position on the bike [63, 64]. Although we did not dive into these aspects in the present study, more research is needed focusing on this issue. We observed how elasticity throughout the week, regardless of muscles, increased significantly ($p = 0.011$), and its

logarithmic value decreased. Only VL significantly increased its elastic property at the end of the competitive week ($p = 0.020$) (Figure 4). These results agree with those found in a previous study; during 7 days of a male cycling competition, the muscles with the best elasticity were BF and RF [21].

Interestingly, the evolution of basal stiffness of the muscles throughout the week was opposite to the general tendency to decrease in postcompetition situations and RF increased their muscle stiffness, significantly at the end of the week (Figure 3). This increase in stiffness can be justified by chronic muscle overload. This can occur due to sustained contractions over time and repetitive activity, usually characterized by strenuous physical activity required by certain sports disciplines, as in our case, when fatigue accumulates throughout a competitive week. This overload condition is involved in an increase in tension and stiffness in the myofascial tissue [65]. Although this increase is poorly documented in the scientific literature, some authors argue that during physical exercise, Ca^{2+} ions accumulate in the sarcoplasm of the muscle cell sarcoplasm, contributing to muscle contractures. Therefore, these contractures can be attenuated with a rest recovery period [32, 65].

4.1. Limitations. Our study has some limitations, such as a small sample size and the lack of objective markers of stress and fatigue levels during and after competition.

5. Conclusion

We found a decrease in muscle tone and stiffness at the end of the competition among professional female cyclists. These effects on muscle properties can be caused both by pre-competition stress and by neuromuscular fatigue after long-term physical exercise. The VL followed by the RF are the muscles that obtained the most significant changes in biomechanical properties and were also the most activated muscles during cycling. All muscles analysed VL, VM, RF, BF, LG, and MG decreased their muscle stiffness after one competition. Generally, basal elasticity improved across the board immediately after the competition and continued to improve until the end of the week.

Data Availability

The raw data were used to support the findings of this study and are included within the supplementary information files.

Disclosure

The work described here is solely reflective of the personal views of the author.

Conflicts of Interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of commercial or financial relationships that could be interpreted as a potential conflicts of interest. The study

results are presented clearly, honestly, and without fabrication, falsification, or inappropriate data manipulation.

Acknowledgments

The authors thank all participants for their time and commitment in undertaking this study and the staff of the women's cycling team for their collaboration during the study.

Supplementary Materials

Supplementary file #1: muscle basal properties. Muscle tone, stiffness, and elasticity in the familiarisation phase. Supplementary file #2: muscle parameters before and after C1.pdf. Muscle tone, stiffness, and elasticity before and after Competition 1. Supplementary file #3: muscle parameters before and after C2.pdf. Muscle tone, stiffness, and elasticity before and after Competition 2. (*Supplementary Materials*)

References

- [1] M. B. Mellion, "Common cycling injuries," *Sports Medicine*, vol. 11, no. 1, pp. 52–70, 1991.
- [2] W. H. Sanner and W. D. O'Halloran, "The biomechanics, etiology, and treatment of cycling injuries," *Journal of the American Podiatric Medical Association*, vol. 90, no. 7, pp. 354–376, 2000.
- [3] M. P. Schwellnus and E. W. Derman, "Common injuries in cycling: prevention, diagnosis and management," *South African Family Practice*, vol. 47, no. 7, pp. 14–19, 2005.
- [4] C. A. Wilber, G. J. Holland, R. E. Madison, and S. F. Loy, "An epidemiological analysis of overuse injuries among recreational cyclists," *International Journal of Sports Medicine*, vol. 16, no. 03, pp. 201–206, 1995.
- [5] C. Barrios, D. Sala, N. Terrados, and J. Valenti, "Traumatic and overuse injuries in elite professional cyclists," *Sports Exercise and Injury*, vol. 3, no. 4, pp. 176–179, 1997.
- [6] N. De Bernardo, C. Barrios, P. Vera, C. Laíz, and M. Hadala, "Incidence and risk for traumatic and overuse injuries in top-level road cyclists," *Journal of Sports Sciences*, vol. 30, no. 10, pp. 1047–1053, 2012.
- [7] B. Clarsen, T. Krosshaug, and R. Bahr, "Overuse injuries in professional road cyclists," *The American Journal of Sports Medicine*, vol. 38, no. 12, pp. 2494–2501, 2010.
- [8] H. S. Haerberle, S. M. Navarro, E. J. Power, M. S. Schickendantz, L. D. Farrow, and P. N. Ramkumar, "Prevalence and Epidemiology of Injuries Among Elite Cyclists in the Tour de France," *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, vol. 6, no. 9, Article ID 232596711879339, 2018.
- [9] J. T. Costello, F. Bieuzen, and C. M. Bleakley, "Where are all the female participants in Sports and Exercise Medicine research?" *European Journal of Sport Science*, vol. 14, no. 8, pp. 847–851, 2014.
- [10] R. Bahr, "No injuries, but plenty of pain? On the methodology for recording overuse symptoms in sports," *British Journal of Sports Medicine*, vol. 43, no. 13, pp. 966–972, 2009.
- [11] D. Bruschetta, D. Milardi, F. Trimarchi et al., "Muscle contracture diagnosis: the role of sonoelastography," *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, vol. 56, no. 12, pp. 1518–1525, 2016.
- [12] B. Eisenberg, *Muscle & Nerve*, vol. 6, Wiley Subscription Services, New York, NY, USA, 1983.
- [13] T. V. Erp and R. P. Lamberts, "Demands of professional female cycling races: influence race level and race duration (single or multi-day events)," *European Journal of Sport Science*, pp. 1–9, 2022.
- [14] I. A. Brody and A. Irwin, "Muscle contracture induced by exercise. A syndrome attributable to decreased relaxing factor," *New England Journal of Medicine*, vol. 281, no. 4, pp. 187–192, 1969.
- [15] F. J. C. Montero, "Fisiología Humana Aplicación a la actividad física," *Editorial Médica Panamericana*, 2012.
- [16] O. García García, V. Serrano Gómez, and R. I. Martínez Lemos, "Tensiomiografía. Un método para evaluar las propiedades contráctiles de los músculos. Evaluación de los flexores y extensores del tronco en mujeres jóvenes," *Cuadernos de Psicología del Deporte*, vol. 11, no. 2, pp. 63–69, 2011.
- [17] J. M. García-Manso, D. Rodríguez-Ruiz, D. Rodríguez-Matoso, Y. de Saa, S. Sarmiento, and M. Quiroga, "Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG)," *Journal of Sports Sciences*, vol. 29, no. 6, pp. 619–625, 2011.
- [18] L. Aird, D. Samuel, and M. Stokes, "Quadriceps muscle tone, elasticity and stiffness in older males: reliability and symmetry using the MyotonPRO," *Archives of Gerontology and Geriatrics*, vol. 55, no. 2, pp. e31–e39, 2012.
- [19] S. Mense and R. D. Gerwin, *Muscle Pain: Understanding the Mechanisms*, Springer, Berlin, Germany, 2010.
- [20] M. P. McHugh, D. A. Connolly, R. G. Eston, and G. W. Gleim, "Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect," *Sports Medicine*, vol. 27, no. 3, pp. 157–170, 1999.
- [21] M. Gervasi, D. Sisti, P. Benelli et al., "The effect of topical thiocolchicoside in preventing and reducing the increase of muscle tone, stiffness, and soreness: a real-life study on top-level road cyclists during stage competition," *Medicine (Baltimore)*, vol. 96, no. 30, p. e7659, 2017.
- [22] T. Meerits, S. Bacchieri, M. Pääsuke, J. Ereline, A. Cicchella, and H. Gapeyeva, "Acute effect of static and dynamic stretching on tone and elasticity of hamstring muscle and on vertical jump performance in track-and-field athletes," *Acta Kinesiologicae Universitatis Tartuensis*, vol. 20, no. 0, p. 48, 2014.
- [23] B. Pożarowszczyk, W. Pawlaczyk, M. Smoter et al., "Effects of karate fights on Achilles tendon stiffness measured by myotonometry," *Journal of Human Kinetics*, vol. 56, no. 1, pp. 93–97, 2017.
- [24] K. Mooney, M. Warner, and M. Stokes, "Symmetry and within-session reliability of mechanical properties of biceps brachii muscles in healthy young adult males using the MyotonPRO device," *Working Papers in the Health Sciences*, vol. 1, pp. 1–11, 2013.
- [25] R. Viir, K. Laiho, J. Kramarenko, and M. Mikkelsen, "Repeatability of trapezius muscle tone assessment by a myometric method," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, vol. 06, no. 02, pp. 215–228, 2006.
- [26] N. van Melick, B. M. Meddeler, T. J. Hoogeboom, M. W. G. Nijhuis-van der Sanden, and R. E. H. van Cingel, "How to determine leg dominance: the agreement between self-reported and observed performance in healthy adults," *PLoS One*, vol. 12, no. 12, Article ID e0189876, 2017.
- [27] A. Bravo-Sánchez, P. Abián, F. Jimenez, and J. Abián-Vicén, "Structural and mechanical properties of the Achilles tendon in senior badminton players: operated vs. non-injured tendons," *Clinical Biomechanics*, vol. 85, Article ID 105366, 2021.

- [28] G. Gavronski, A. Veraksits, E. Vasar, and J. Maarooos, "Evaluation of viscoelastic parameters of the skeletal muscles in junior triathletes," *Physiological Measurement*, vol. 28, no. 6, pp. 625–637, 2007.
- [29] H. J. Hermens, B. Freriks, C. Disselhorst-Klug, and G. Rau, "Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 10, no. 5, pp. 361–374, 2000.
- [30] R. Edmonds, B. Burkett, A. Leicht, and M. McKean, "Effect of chronic training on heart rate variability, salivary IgA and salivary alpha-amylase in elite swimmers with a disability," *PLoS One*, vol. 10, no. 6, Article ID e0127749, 2015.
- [31] M. Mateo, C. Blasco-Lafarga, I. Martínez-Navarro, J. F. Guzmán, and M. Zabala, "Heart rate variability and pre-competitive anxiety in BMX discipline," *European Journal of Applied Physiology*, vol. 112, no. 1, pp. 113–123, 2012.
- [32] J. A. Leppik, R. J. Aughey, I. Medved, I. Fairweather, M. F. Carey, and M. J. McKenna, "Prolonged exercise to fatigue in humans impairs skeletal muscle Na⁺-K⁺-ATPase activity, sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ release, and Ca²⁺ uptake," *Journal of Applied Physiology*, vol. 97, no. 4, pp. 1414–1423, 2004.
- [33] M. Pluess, A. Conrad, and F. H. Wilhelm, "Muscle tension in generalized anxiety disorder: a critical review of the literature," *Journal of Anxiety Disorders*, vol. 23, no. 1, pp. 1–11, 2009.
- [34] U. Lundberg, R. Kadefors, B. Melin et al., "Psychophysiological stress and EMG activity of the trapezius muscle," *International Journal of Behavioral Medicine*, vol. 1, no. 4, pp. 354–370, 1994.
- [35] U. Lundberg, I. E. Dohns, B. Melin et al., "Psychophysiological stress responses, muscle tension, and neck and shoulder pain among supermarket cashiers," *Journal of Occupational Health Psychology*, vol. 4, no. 3, pp. 245–255, 1999.
- [36] W. H. McNulty, R. N. Gevirtz, D. R. Hubbard, and G. M. Berkoff, "Needle electromyographic evaluation of trigger point response to a psychological stressor," *Psychophysiology*, vol. 31, no. 3, pp. 313–316, 1994.
- [37] J. C. Cervantes Blásquez, G. Rodas Font, and L. Capdevila Ortis, "Heart-rate variability and precompetitive anxiety in swimmers," *Psicothema*, vol. 21, no. 4, pp. 531–536, 2009.
- [38] R. A. Souza, O. A. B. Beltran, D. M. Zapata et al., "Heart rate variability, salivary cortisol and competitive state anxiety responses during pre-competition and pre-training moments," *Biology of Sport*, vol. 36, no. 1, pp. 39–46, 2019.
- [39] M. G. Fernandes, J. Vasconcelos-Raposo, and H. M. Fernandes, "Propriedades psicométricas do CSAI-2 em atletas brasileiros," *Psicologia: Reflexão e Crítica*, vol. 25, no. 4, pp. 679–687, 2012.
- [40] R. Dahmane, V. Valenčič, N. Knez, and I. Eržen, "Evaluation of the ability to make non-invasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response," *Medical, and Biological Engineering and Computing*, vol. 39, no. 1, pp. 51–55, 2001.
- [41] D. Krizaj, B. Simunic, and T. Zagar, "Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 18, no. 4, pp. 645–651, 2008.
- [42] J. T. Viitasalo, P. V. Komi, I. Jacobs, and J. Karlsson, "Effects of prolonged cross-country skiing on neuromuscular performance," *Exercise Sports Biology*, vol. 12, pp. 191–198, 1982.
- [43] A. St Clair Gibson, E. J. Schabort, and T. D. Noakes, "Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling," *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, vol. 281, no. 1, pp. R187–R196, 2001.
- [44] G. Y. Millet, R. Lepers, N. A. Maffiuletti, N. Babault, V. Martin, and G. Lattier, "Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon," *Journal of Applied Physiology*, vol. 92, no. 2, pp. 486–492, 1985. 2002.
- [45] A. Koller, J. Mair, W. Schobersberger et al., "Effects of prolonged strenuous endurance exercise on plasma myosin heavy chain fragments and other muscular proteins. Cycling vs running," *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, vol. 38, no. 1, pp. 10–17, 1998.
- [46] F. Canon and F. Goubel, "Changes in stiffness induced by hindlimb suspension in rat soleus muscle," *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology*, vol. 429, no. 3, pp. 332–337, 1995.
- [47] J. N. Howell, G. Chleboun, and R. Conatser, "Muscle stiffness, strength loss, swelling and soreness following exercise-induced injury in humans," *The Journal of Physiology*, vol. 464, no. 1, pp. 183–196, 1993.
- [48] J. Booth, M. J. McKenna, P. A. Ruell et al., "Impaired calcium pump function does not slow relaxation in human skeletal muscle after prolonged exercise," *Journal of Applied Physiology*, vol. 83, no. 2, pp. 511–521, 1985. 1997.
- [49] R. Lepers, C. Hausswirth, N. Maffiuletti, J. Brisswalter, and J. Van Hoecke, "Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 32, no. 11, pp. 1880–1886, 2000.
- [50] D. G. Allen, J. Lännergren, and H. Westerblad, "Muscle cell function during prolonged activity: cellular mechanisms of fatigue," *Experimental Physiology*, vol. 80, no. 4, pp. 497–527, 1995.
- [51] J. M. Metzger and R. L. Moss, "Effects of tension and stiffness due to reduced pH in mammalian fast- and slow-twitch skinned skeletal muscle fibres," *The Journal of Physiology*, vol. 428, no. 1, pp. 737–750, 1990.
- [52] J. M. Davis and S. P. Bailey, "Possible mechanisms of central nervous system fatigue during exercise," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 29, no. 1, pp. 45–57, 1997.
- [53] C. T. Davies and M. W. Thompson, "Physiological responses to prolonged exercise in ultramarathon athletes," *Journal of Applied Physiology*, vol. 61, no. 2, pp. 611–617, 1986.
- [54] J. Avela, H. Kyröläinen, and P. V. Komi, "Altered reflex sensitivity after repeated and prolonged passive muscle stretching," *Journal of Applied Physiology*, vol. 86, no. 4, pp. 1283–1291, 1999.
- [55] U. Windhorst and G. Boorman, "Overview: potential role of segmental motor circuitry in muscle fatigue," *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 384, pp. 241–258, 1995.
- [56] G. Gavronski, A. Veraksits, E. Vasar, and J. Maarooos, "Evaluation of viscoelastic parameters of the skeletal muscles in junior triathletes," *Physiological Measurement*, vol. 28, no. 6, pp. 625–637, 2007.
- [57] M. E. Tschakovsky and D. D. Sheriff, "Immediate exercise hyperemia: contributions of the muscle pump vs. rapid vasodilation," *Journal of Applied Physiology*, vol. 97, no. 2, pp. 739–747, 2004.
- [58] G. F. Elliott and C. R. Worthington, "Muscle contraction: viscous-like frictional forces and the impulsive model," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 29, no. 3, pp. 213–218, 2001.
- [59] V. Hein and A. Vain, "Joint mobility and the oscillation characteristics of muscle," *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, vol. 8, no. 1, pp. 7–13, 1998.

- [60] P. V. Komi, "Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle," *Journal of Biomechanics*, vol. 33, no. 10, pp. 1197–1206, 2000.
- [61] Y. Jammes, S. Arbogast, M. Faucher, A. Montmayeur, F. Tagliarini, and C. Robinet, "Interindividual variability of surface EMG changes during cycling exercise in healthy humans," *Clinical Physiology*, vol. 21, no. 5, pp. 556–560, 2001.
- [62] J. C. L. da Silva, O. Tarassova, M. M. Ekblom, E. Andersson, G. Rönquist, and A. Arndt, "Quadriceps and hamstring muscle activity during cycling as measured with intramuscular electromyography," *European Journal of Applied Physiology*, vol. 116, no. 9, pp. 1807–1817, 2016.
- [63] M. Arkesteijn, S. Jobson, J. Hopker, and L. Passfield, "The effect of cycling intensity on cycling economy during seated and standing cycling," *International Journal of Sports Physiology and Performance*, vol. 11, no. 7, pp. 907–912, 2016.
- [64] S. Vogt, K. Roecker, Y. O. Schumacher et al., "Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France," *International Journal of Sports Medicine*, vol. 29, no. 3, pp. 244–250, 2008.
- [65] J. Vissing and R. G. Haller, "Mechanisms of exertional fatigue in muscle glycogenoses," *Neuromuscular Disorders*, vol. 22, no. Suppl 3, pp. S168–S171, 2012.



The menstrual cycle minimally affects cardiorespiratory function and body balance control in trained women during acute hypobaric hypoxia exposure (4000 m)

Cristina Rotllan¹ · Jan Hagenaers¹ · Marc Colls¹ · Ginés Viscor¹

Received: 16 January 2025 / Accepted: 19 March 2025
© The Author(s) 2025

Abstract

Purpose The impact of the menstrual cycle (MC) on physical performance has been a hot topic in recent years, due to the increasing professionalisation of women's sports. This study set out to investigate the impact of the MC on the performance of women athletes in a hypoxic environment. The study focused on cardiovascular responses, respiratory function, and postural control as key indicators of sports performance.

Methods We measured the physiological responses in 20 participants under hypobaric hypoxia (HH) conditions, on two occasions: during the early follicular phase (F) and in the mid-luteal phase (L). Spirometry and postural control parameters at rest were evaluated at sea level and 4000 m simulated altitude in a hypobaric chamber. The exercise performed at hypoxia was divided into two phases of different workload intensities: 40% and 70% of their theoretical maximal rate of oxygen consumption ($\dot{V}O_{2\max}$), followed by a recovery period.

Results Tidal volume (VT) significantly decreased at the L phase compared to the F during high intensity exercise (1.69 vs. 1.82, $p \leq 0.05$) and arterial oxygen saturation (SaO_2) was greater in the L phase versus F independently of the exercise intensity ($p \leq 0.01$) under hypoxic conditions. Meanwhile, spirometry and other cardiorespiratory responses did not change across the MC. Lateral velocity increased in the L phase with eyes open compared to F (4.88 vs. 4.24, $p \leq 0.05$). No significant differences in the performance metrics evaluated between the menstrual cycle phases or between exercise intensities were detected.

Conclusion Our data confirms that the menstrual cycle in women does not generate sufficiently marked alterations to affect sports performance when acutely exposed to high altitudes.

Keywords Female athlete · Sports performance · Menstrual cycle · High altitude · Body balance control · Spirometry · Submaximal exercise

Abbreviations

BP	Blood pressure
CoP	Centre of pressure
CVM- 22	Menstrual Quality of Life Questionnaire
EC	Eyes closed
EO	Eyes open
F	Early follicular phase

FEF25 - 75	Forced expiratory flow between 25 and 75% of forced vital capacity
FET	Forced expiratory time
FEV1	Forced expiratory volume in the first second
FEV1/FVC	Forced expiratory volume in the first second/forced vital capacity ratio
FIVC	Forced inspiratory volume capacity
FVC	Forced vital capacity
HCR	Hypoxic cardiac response
HH	Hypobaric hypoxia
HR	Heart rate
HVR	Hypoxic ventilatory response
L	Mid-luteal phase
MC	Menstrual cycle
PEF	Peak expiratory flow
PIF	Peak inspiratory flow

Communicated by Klaas R Westerterp.

✉ Cristina Rotllan
crisrotllan@gmail.com

¹ Facultat de Biologia, Physiology Section, Department of Cell Biology, Physiology and Immunology, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain

Rf	Respiratory frequency
RPE	Rate of perceived exertion
SaO ₂	Arterial oxygen saturation
SL	Sea level
$\dot{V}E$	Ventilation
$\dot{V}O_{2max}$	Maximal rate of oxygen consumption
VT	Tidal volume

Introduction

The number of women practising and competing in sports has increased in the last decades, not only at low-, but also at high-altitude conditions under hypobaric hypoxia (HH) (Horakova et al. 2023). However, the underrepresentation of women in sports science research demands immediate action to delve into female physiology responses during exercise (Costello et al. 2014), to let female athletes achieve their real performance. Ovarian hormones fluctuate cyclically across the menstrual cycle during the fertile years. The follicular phase (F) is the first part of the cycle from the menses, where hormones are at their lowest level to ovulation characterised by high levels of oestrogens. The second part starts after ovulation; oestrogens and progesterone rise progressively until their peak in the mid-luteal phase (L), followed by a decrease in hormone levels until the MC finish the day before bleeding (Elliott-Sale et al. 2021). Despite the scarcity of literature on this topic, in the last two decades, there has been an increase in interest in understanding the potential effect of MC on athletic performance, metabolism, thermoregulation, injuries and recovery (Lei et al. 2019; Romero-Parra et al. 2020; Martin et al. 2021; Barba-Moreno et al. 2022; Williams et al. 2023; Smith et al. 2024). However, research investigating physiological responses to hypoxia across the MC is poorly understood (Raberin et al. 2024).

Exposure to exercise under hypoxic conditions is doubly stressed and performance is limited due to acclimatisation capacity (Ulrich et al. 2017). A decrease in maximal oxygen consumption at different altitudes has been associated with a drop in aerobic performance (West et al. 1983; Wehrlin and Hallén 2006) and similar findings in female runners (Woorons et al. 2005). Upon respiratory system stress during hypoxic exercise at 5,050 m, diaphragm fatigue ensues (Cibella et al. 1996) along with a decrease in arterial oxygen saturation (SaO₂) (Woorons et al. 2005). Furthermore, the cardiovascular system also plays a central role in hypoxic adaptation, with increased cardiac output and reduced blood transit time at pulmonary capillaries, thus limiting alveolar–arterial diffusion (Ulrich et al. 2017).

Given the established significance of the cardiovascular and respiratory systems on hypoxia adaptation during exercise, the potential impact of female hormones on these

systems is a subject of interest. It was hypothesised that oestrogens could improve aerobic performance due to the potential vasodilator effect on the central and peripheral vascular system, boosting blood flow in the muscles and heart, via nitric oxide signalling (Lebrun et al. 2013). Progesterone, the principal hormone in the L phase, has been defined as a regulator of the respiratory function, increasing the respiratory frequency (Rf), yet the precise mechanism is already unknown (Behan and Wenninger 2008). One way progesterone may act is by changing the sensitivity of hypothalamic receptors, thereby reducing the threshold of the respiratory centre and increasing ventilation ($\dot{V}E$) (Rael et al. 2021). It has previously been described how progesterone increases body temperature and its role in thermoregulation (Janse de Jonge 2003). Higher $\dot{V}E$, heart rate (HR) and tidal volume (VT) at different exercise intensities in the L phase were also found (Rael et al. 2021; Barba-Moreno et al. 2022). In addition, the role of sex hormones in the muscle, bone, ligament and nervous system could impact postural balance and increase injury risk during the L phase (Möller-Nielsen and Hammar 1989).

Regarding the hypoxic ventilatory response (HVR), studies are scarce and often employ different methodologies. In a large cohort study, 336 premenopausal women at 4000 m had significant HVR responses during the L phase, with greater SaO₂, but not in the hypoxic cardiac response (HCR) (Richalet et al. 2020). Contradictory findings with no changes across the MC were also found (Takase et al. 2002).

The main objective of the present study was to assess the effects of MC on cardiorespiratory and balance response at HH, at rest and during hypoxic exercise at two different intensities in 20 eumenorrheic female cyclists and runners. Furthermore, we hypothesised that subtle differences in physical capacity due to variations in the menstrual cycle, which are not noticeable at sea level, could become evident under simulated altitude conditions. We selected well-trained women of a wide range of ages based on the hypothesis that the high levels of circulating oestrogens and progesterone during the L phase could impact physical performance by increasing aerobic capacity. We also tested the hypothesis that acute hypoxia exposure could affect body balance differently along the MC.

Methods

Participants

A total of 20 eumenorrheic women, aged between 18 and 49 years, were included in this study (Table 1). To be eligible for participation, women were required to have a regular MC, (length between 21 and 36 days and no menstrual irregularities) and to have refrained from using hormonal

Table 1 Anthropometric characteristics of the participants ($n = 20$)

	Mean $\pm$ SD	Range
Age (years)	33.95 $\pm$ 9.11	18–47
Body weight (kg)	56.48 $\pm$ 5.21	48–67
Height (cm)	166.4 $\pm$ 5.87	157–178
BMI	20.41 $\pm$ 1.71	17.86–23.33

BMI body mass index

Table 2 Menstrual cycle characteristics ($n = 20$)

	Mean $\pm$ SD	Minim	Maxim
Follicular phase length (n° days)	14.43 $\pm$ 3.05	9	18
Luteal phase length (n° days)	14.3 $\pm$ 3.66	9	26
Ovulation day	14 $\pm$ 2.12	9	17

contraceptive treatments for at least 3 months before recruitment. Additionally, all participants were required to be in good health and to have undergone a minimum of 150 min of aerobic exercise/week. Prior to their involvement in the study, all participants were informed about the tests included in the protocol and were required to sign a written consent form. The study was carried out according to the Declaration of Helsinki for human experimentation and approved by the Institutional Ethical Committee from the University of Barcelona (IRB 00003099; CER022441).

Menstrual cycle determination

To determine the phases of the MC during the assay, the participants recorded their menstruations in a FitrWoman app (FitrWoman Ltd., n.d.). They also performed urine LH tests (LH60 Ovulation Test Strips 8 MomMed kit) daily from day 7 of the cycle until a positive result was obtained. The urine tests were conducted in the morning with the first urine sample or in some cases, at midday, approximately

3–4 h after the last urine sample. The participants were requested to send a photograph of the test result daily to one of the researchers. The MC phases were determined based on the provided cycle data. The MC phases studied were phase 1, the early follicular phase (F), which corresponds to the initial 5 days of menstruation, and phase 4, defined as the mid-luteal phase (L), which occurs between days 7 and 9 following a positive ovulation test. However, the MC phase determination in this way has some limitations. Serum analysis was not performed and hormonal status could not be accurately determined (Elliott-Sale et al. 2021). The MC characteristics are shown in Table 2.

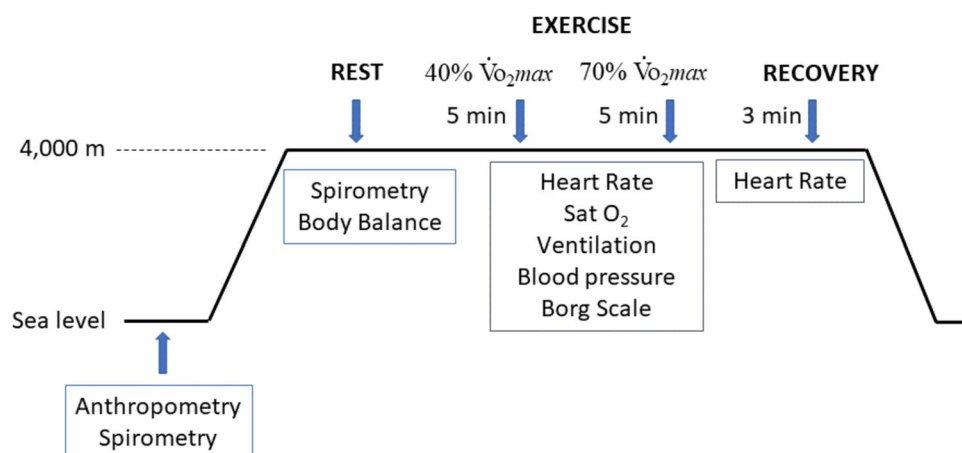
Acute hypobaric hypoxia

Spirometry, body balance and submaximal two-phase exercise tests were conducted in a hypobaric chamber (Moelco Técnicas Aplicadas SL; Terrassa, Spain) decompressed to the barometric pressure equivalent of 4000 m of altitude (616 hPa). All the hypobaric exposures were completed within 40–90 min, depending on the number of participants evaluated in the same hypobaric exposure trial.

Study design

Participants were referred to the Service of Hypobaria and Biomedical Physiology of the University of Barcelona. Measurements were made under normobaric conditions at sea level (SL) and a simulated altitude equivalent to 4,000 m in the hypobaric chamber (HH). The experimental protocol was repeated twice in two MC phases (F and L). The first visit was performed at a randomly selected phase of the MC, and their body weight and height were recorded. The design of the study is shown in Fig. 1.

Submaximal exercise. The exercise protocol was performed cycling under HH (Bike ERG, Concept2®; Morrisville, EUA) starting with a 3-min warm-up (< 40% theoretical $\dot{V}O_{2max}$), followed by two 5-min periods of

Fig. 1 Study design

low intensity (40% theoretical $\dot{V}O_{2\max}$) and high intensity (70% theoretical $\dot{V}O_{2\max}$). Intensities were calculated using the Åstrand table. Immediately after exercise, participants stopped cycling and rested on the cycle ergometer for 3 min.

Spirometry. The pulmonary function was assessed first under SL and, then, under HH at rest conditions using a spirometer (Easy-on PC; ndd Medical Technologies; Zurich, Switzerland) and its companion software (Connect V03.09.05.19; ndd Medical Technologies; Zurich, Switzerland). This equipment is based on ultrasonic non-contact technology (TrueFlow™), does not require calibration and is independent of environmental variables (humidity, temperature, pressure and changes in composition (molar mass) of air). Participants sitting down in a chair performed a minimum of three valid standard manoeuvres to check test repeatability. The automatic quality control function allows the selection of grade A (optimal) test data. Forced vital capacity (FVC), forced expiratory volume in the first second (FEV1), FEV1/FVC ratio (FEV1/FVC), forced expiratory flow between 25 and 75% of forced vital capacity (FEF25–75), peak expiratory flow (PEF), forced expiratory time (FET), forced inspiratory volume capacity (FIVC) and peak inspiratory flow (PIF) were registered. In addition, tidal volume (VT), respiratory frequency (Rf) and lung ventilation ($\dot{V}E$) were measured at HH during the last minute of each exercise intensity.

Oxygen saturation, heart rate and rate of perceived exertion. Oxygen saturation (SpO_2) was monitored by a pulse oximeter (Nonin Onyx II 9550) from the index finger of the right hand. Heart rate (HR) was obtained with a chest strap sensor (HRM-Dual, Garmin Ltd; Kansas, EUA). The rate of perceived exertion (RPE) was asked according to the Borg scale (Borg 1970). These parameters were recorded during the last minute of each exercise intensity under HH.

Blood pressure and heart rate recovery. Blood pressure (BP) was measured employing a tensiometer (Omron M3) just at the end of the exercise protocol. The HR was recorded at 1, 2 and 3 min after stopping the exercise, while participants rested quietly on the cycle ergometer.

Plantar pressure parameters. Body balance control was evaluated under HH in two conditions, starting with their eyes open (EO) and followed with their eyes closed (EC) by a plantar pressure platform (Podoprint, Namrøl Medical S.L.; Barcelona, Spain). Participants were instructed to rest on the platform barefoot with a relaxed and stable posture. In an EO condition, they had to focus their gaze on a point at 3 m distance and 1.70 m height. After that, it was repeated with EC. Participants maintained both positions for 1 min and rested 1 min between them. Ten postural parameters according to the recorded variation in the

centre of pressure (CoP) were evaluated: total track length, track surface, length/surface ratio, mean velocity of CoP, lateral velocity, anterior velocity, lateral variation, anterior variation, *x-axis* displacement and *y-axis* displacement.

Symptoms across the menstrual cycle. CVM- 22 is a self-reported questionnaire validated in the Spanish language, which evaluates the menstrual quality of life. It has 19 questions in three categories: health perception and physical and functional well-being; symptoms; and psychological cognitive well-being. CVM- 22 uses a Likert scale to determine the frequency of each symptom. A score of three points reports a symptom that was “never” experienced, two points “sometimes”, one point “often” and zero point “always”. The higher the score (out of 66), the better is the menstrual quality of life (Torres-Pascual et al. 2019). Moreover, an online survey was created by using Google Forms, to evaluate symptoms across the MC and their negative impact on training and competitions.

Statistical analysis

Firstly, data distribution was checked with the Shapiro–Wilk test. Cardiorespiratory responses and postural parameters were compared by two-way RM ANOVA, between the MC phases and altitude (SL/HH), exercise intensity (low/high) or eye condition (open/closed). When no normal distribution was found, the Friedman test and Kruskal–Wallis test were performed. For multiple comparisons, post hoc analyses were made according to Tukey and Bonferroni tests. Comparison among MC phases was done with paired *t* test and Wilcoxon test. The Pearson test was used to assess the influence of age or type of sport. Significant differences were considered when $p \leq 0.05$. Statistical analysis was performed using R (Version 4.4.1).

Results

The anthropometrical characteristics of the participants and their MC features are represented in Tables 1 and 2, respectively.

Spirometry

A comparison of resting pulmonary function at SL and HH during the F and L phases by standard spirometry is shown in Table 3. As expected, notable discrepancies between altitudes were observed in FEF25–75, PEF and PIF ($p \leq 0.0001$). These parameters are influenced by the reduction in air density that occurs at high altitudes due to the low barometric pressure causing gas volume expansion (Netzer et al. 2022). No significant discrepancies were identified between the MC phases. Post hoc analysis revealed statistically

Table 3 Forced spirometry at rest

Parameters	Altitude	Follicular (<i>n</i> = 19)	Luteal (<i>n</i> = 19)	<i>p</i> value MC phase	Cohen's <i>d</i>	<i>p</i> value MC × altitude
FVC	SL	3.97 (0.45)	3.99 (0.46)	0.691	− 0.025	0.223
(L)	HH	3.95 (0.45)	3.92 (0.43)	0.433	0.073	
FEV1	SL	3.31 (0.43)	3.35 (0.48)	0.260	− 0.083	0.695
(L)	HH	3.35 (0.39)	3.36 (0.43)	0.806	− 0.032	
FEV1/FVC	SL	0.83 (0.06)	0.84 (0.06)	0.841	− 0.09	< 0.0001
(%)	HH	0.85 (0.05)	0.86 (0.05)	0.687	− 0.158	
FEF25 - 75	SL	3.67 (0.84)	3.72 (1.03)#	0.545	− 0.058	0.603
(L/s)	HH	4.09 (1.05)	4.23 (1.11)	0.454	− 0.131	
PEF	SL	7.20 (1.63)	7.61 (1.26)#	0.157	− 0.281	0.954
(L/s)	HH	8.32 (2.00)	8.74 (1.42)	0.200	− 0.247	
FET	SL	6.06 (1.16)	5.84 (1.32)	0.384	0.179	0.028
(s)	HH	5.58 (1.35)	5.28 (1.35)	0.314	0.219	
FIVC	SL	3.76 (0.49)	3.76 (0.41)	1.000	− 0.004	0.486
(L)	HH	3.73 (0.49)	3.81 (0.43)	0.095	− 0.18	
PIF	SL	4.84 (1.27)	4.79 (1.50)#	0.804	0.035	0.991
(L/s)	HH	5.61 (1.59)	5.57 (1.52)	0.827	0.029	

Bold character indicates *p* value lower than 0.05 ($p < 0.05$)

Mean values and standard deviation (SD). # Significant differences between altitudes, SL vs HH ($p \leq 0.0001$). Interaction between altitude and MC phase factors are in bold for a *p* value $p \leq 0.05$

MC menstrual cycle, SL sea level, HH hypobaric hypoxia, FVC forced vital capacity, FEV1 forced expiratory volume in the first second, FEV1/FVC FEV1/FVC Ratio, FEF25 - 75 forced expiratory flow between 25 and 75% of forced vital capacity, PEF peak expiratory flow, FET forced expiration time, FIVC forced inspiratory volume capacity, PIF peak inspiratory flow

significant differences between the MC phases and altitude on FEV1/FVC ($p < 0.0001$) and FET ($p = 0.028$).

plays a significant role in the influence of female hormones at high altitudes.

Cardiorespiratory responses during exercise at high altitude

Cardiorespiratory response data in the F and L phases were obtained from 20 women during a submaximal exercise test at HH (Table 4). Significant differences in SaO₂ ($p \leq 0.01$) were observed between the two phases of the MC, with higher oxygenation in the L (vs. F) phase, regardless of the intensity of exercise. Additionally, VT recorded at high intensity was significantly reduced in the L compared to the F phase ($p = 0.053$), resulting in a 7.69% decline (Fig. 2). The general trend, not always statistically significant, of Rf, VE and SaO₂, revealed an increase in the L phase (vs. F), both at low and high intensity (Figs. 3, 4 and 5). This pattern, is consistent with a higher work of breathing in females to achieve the VE demands during exercise (Guenette et al. 2007). Multiple comparisons revealed statistically significant differences in VT, VE and Borg between the intensity and MC phases ($p = 0.033$, $p \leq 0.0001$, $p \leq 0.0001$, respectively). There were also significant pair comparisons between exercise intensities at the same and different MC phases. This seems to suggest that the intensity of exercise

Blood pressure and heart rate recovery after exercise

The systolic and diastolic pressure were measured immediately after the end of the exercise and no differences between the MC phases were found. Moreover, HR recovery was measured on the 3-min post-exercise and no significant differences were observed between the MC phases.

Body balance control

Postural control values were assessed at simulated HH, according to the CoP using a foot pressure platform in stable posture with EO and EC. As demonstrated in Table 5, only lateral velocity at EO was statistically different between the MC phases, higher in the L (4.88) vs. F (4.24) phase ($p = 0.045$). However, significant differences between eye conditions were found in CoP track length, mean velocity of CoP and anterior velocity ($p \leq 0.05$), curiously with higher unbalances on the EO condition. Interaction analysis showed significant global effects on CoP track length, mean velocity of CoP and lateral and anterior velocities ($p = 0.033$, $p = 0.049$, $p = 0.028$, $p = 0.029$, respectively). A subsequent

Table 4 Cardiorespiratory responses at different exercise intensities under hypobaric hypoxia

Parameters	Exercise intensity	Follicular (<i>n</i> = 17)	Luteal (<i>n</i> = 17)	<i>p</i> value MC phase	Cohen's <i>d</i>	<i>p</i> value MC phase × exercise intensity
VT (L)	Low	1.47 (0.36)	1.50 (0.26)#	0.786	− 0.073	0.033
	High	1.82 (0.31)	1.69 (0.20)*	0.053	0.506	
Rf (breaths/min)	Low	15.64 (4.21)	16.25 (5.13)#	0.649	− 0.131	0.223
	High	19.97 (5.56)	22.03 (6.07)	0.154	− 0.353	
VE (L/min)	Low	22.05 (4.38)	23.54 (5.85)#	0.353	− 0.289	< 0.0001
	High	35.67 (9.38)	36.72 (10.16)	0.818	− 0.109	
SaO ₂ (%)	Low	76.90 (3.26)	78.70 (4.00) +	0.061	− 0.484	0.625
	High	75.95 (4.29)	77.15 (2.96)	0.090	− 0.326	
HR (bpm)	Low	122.95 (11.33)	123.90 (13.36)#	0.704	− 0.078	0.579
	High	146.30 (14.02)	148.30 (13.53)	0.203	− 0.147	
Borg scale	Low	9.00 (1.49)	9.00 (1.59)#	1.000	0	< 0.0001
	High	12.45 (1.05)	11.95 (1.54)	0.175	0.378	

Bold character indicates *p* value lower than 0.05 ($p < 0.05$)

Mean values and standard deviation (SD). *Significant differences between MC phases ($p \leq 0.05$), # significant differences between exercise intensity at simulated altitude, low vs high ($p \leq 0.0001$), + significant differences between the MC phases not taking into account the exercise intensity ($p \leq 0.01$). Interaction between exercise intensity and MC phase factors are in bold for a *p* value $p \leq 0.05$

MC: menstrual cycle, VT tidal volume, Rf respiratory frequency, VE minute ventilation, SaO₂ peripheral arterial oxygen saturation, HR heart rate

Fig. 2 Violin plots illustrating tidal volume (L) according to exercise intensities (low and high) and MC phases (follicular and luteal). The density curves represent the distribution of the data, with inner box plots showing the interquartile range and median values. Individual data points are shown, connected by dashed lines to indicate the repeated measures for each participant. Means are highlighted in red and connected for comparison between phases

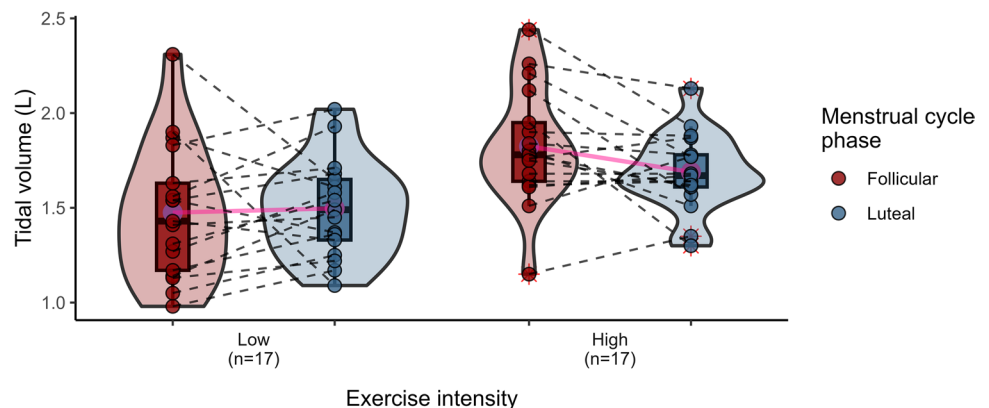
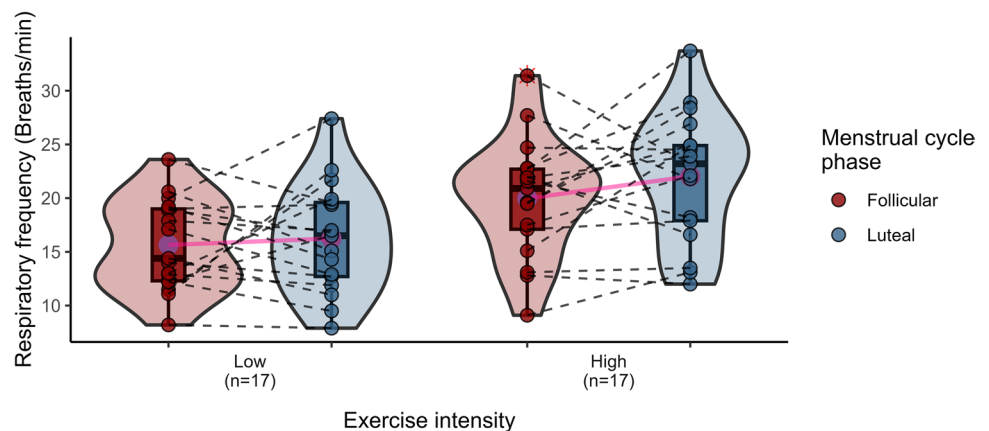


Fig. 3 Violin plots illustrating respiratory frequency (breaths/min) according to exercise intensities (low and high) and MC phases (follicular and luteal). The density curves represent the distribution of the data, with inner box plots showing the interquartile range and median values. Individual data points are shown, connected by dashed lines to indicate repeated measures for each participant. Means are highlighted in pink and connected for comparison between phases



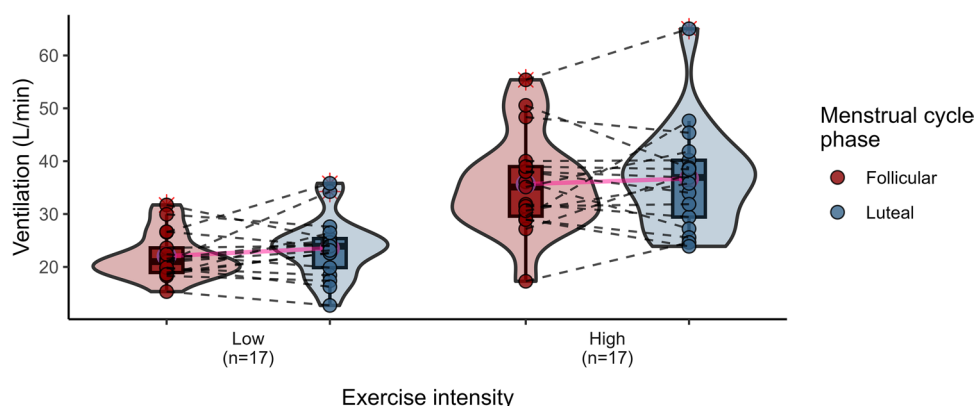
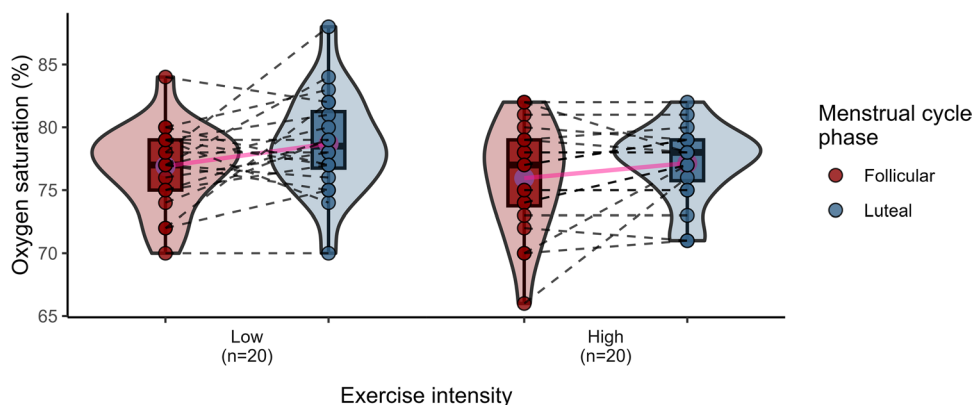


Fig. 4 Violin plots illustrating pulmonary ventilation (L/min) according to exercise intensities (low and high) and MC phases (follicular and luteal). The density curves represent the distribution of the data, with inner box plots showing the interquartile range and median val-

ues. Individual data points are shown, connected by dashed lines to indicate repeated measures for each participant. Means are highlighted in pink and connected for comparison between phases

Fig. 5 Violin plots illustrating oxygen saturation (%) according to exercise intensities (low and high) and MC phases (follicular and luteal). The density curves represent the distribution of the data, with inner box plots showing the interquartile range and median values. Individual data points are shown, connected by dashed lines to indicate repeated measures for each participant. Means are highlighted in pink and connected for comparison between phases



analysis of the pairwise comparisons revealed significance on the CoP track length, mean velocity of CoP and lateral velocity, indicating more instability on the L phase in the EO condition (vs. F with EC).

Menstrual cycle symptoms and impact on exercise performance

Menstrual quality of life was assessed by the CVM- 22 questionnaire and surveyed participants online to measure the negative impact of MC phases on training and competition. The CVM- 22 results (Table 6), clearly indicated that psychological and cognitive well-being were the most affected areas during the menstrual days. Participants' "sometimes" responses, in psychological well-being, physical health and symptoms, were 47.50, 39 and 27.50%, respectively. Frequencies of symptoms and the negative impact on exercise performance are shown in Figs. 6 and 7. The premenstrual phase was the most symptomatic phase, followed closely by the menstrual phase, with an average of 6.12 and 5.89 symptoms, respectively. Mood changes, acne, cravings and

irritability were more prevalent in the premenstrual phase, characterised in the PMS (Daley 2009). The menstrual phase was more affected by somatic symptoms than mental ones. This result contrasts with the answers of CVM- 22. Menstrual days had the greatest impact on general performance, with 88.2% ($n = 15$) of respondents reporting negative effects. This was followed by premenstrual days with 35.3% ($n = 6$). These results align with many respondents who altered their training load during the menstrual days (80%, $n = 16$). Moreover, 40% ($n = 8$) of participants interrupted their training routine during this MC phase.

Discussion

This study aimed to evaluate the effects of MC on aerobic performance under HH. To determine the exercise performance, ventilatory and cardiorespiratory responses under equal intensity exercise and postural control were assessed on two MC phases: F and L (Elliott-Sale et al. 2021). Our key findings included a significantly decreased VT at high

Table 5 Balance results under hypoxia

Parameters	Eyes	Follicular (<i>n</i> = 19)	Luteal (<i>n</i> = 19)	<i>p</i> value MC phase	Cohen's <i>d</i>	<i>p</i> value MC phase × eyes
CoP track length (mm)	Open	313.01 (90.06)	350.36 (95.52)#	0.123	− 0.400	0.033
	Closed	280.32 (77.53)	299.08 (91.43)	0.418	− 0.223	
Surface (mm ²)	Open	179.68 (183.46)	158.36 (165.03)	0.595	0.124	0.837
	Closed	114.24 (109.23)	139.13 (189.80)	0.709	− 0.162	
Length/surface (mm ^{−1})	Open	4.84 (5.05)	4.49 (3.37)	0.952	0.082	0.846
	Closed	5.03 (4.93)	5.44 (4.54)	0.702	− 0.087	
Mean velocity of CoP (mm/s)	Open	5.38 (1.51)	6.05 (1.66)#	0.165	− 0.417	0.049
	Closed	4.87 (1.35)	5.19 (1.56)	0.421	− 0.222	
Lateral velocity (mm/s)	Open	4.24 (1.11)	4.88 (1.43)*	0.045	− 0.488	0.028
	Closed	3.88 (1.17)	4.15 (1.12)	0.408	− 0.232	
Antero-posterior velocity (mm/s)	Open	3.26 (1.17)	3.49 (1.04)#	0.360	− 0.211	0.029
	Closed	2.88 (0.86)	3.08 (1.25)	0.587	− 0.193	
Lateral variation (mm)	Open	2.03 (1.18)	1.78 (0.86)	0.632	0.236	0.669
	Closed	1.87 (1.05)	1.63 (0.82)	0.184	0.259	
Antero-posterior variation (mm)	Open	3.41 (2.74)	3.60 (2.56)	0.763	− 0.072	0.832
	Closed	3.23 (2.13)	3.30 (2.70)	0.984	− 0.031	
<i>x</i> -axis displacement (mm)	Open	− 9.16 (8.88)	− 9.19 (10.59)	0.393	0.003	0.398
	Closed	− 7.39 (8.92)	− 6.88 (9.80)	0.745	− 0.055	
<i>y</i> -axis displacement (mm)	Open	2.56 (20.81)	− 1.23 (12.75)	0.745	0.221	0.229
	Closed	0.54 (16.78)	6.92 (14.13)	0.151	− 0.408	

Bold character indicates *p* value lower than 0.05 ($p < 0.05$)

Mean values and standard deviation (SD). *Significant differences between the MC phases ($p \leq 0.05$), # significant differences between eyes' condition, EO vs EC ($p \leq 0.0001$). Interaction between eyes' condition and MC phase factors are in bold for a *p* value $p \leq 0.05$

MC menstrual cycle, EO open eyes, EC eyes closed, CoP centre of pressure

Table 6 Results of CVM- 22 questionnaire (*n* = 20)

Dimensions	Frequencies			
	Always	Often	Sometimes	Never
Health perception and physical/functional well-being	5	13	39	43
Psychological and cognitive well-being	5.63	16.88	47.50	30
Symptoms	3.75	15	27.50	53.75

Frequencies are expressed as a percentage of the total sample. CVM- 22 Menstrual Quality of Life Questionnaire

intensity in L compared to F and increased SaO₂ in L compared to F during exercise at a simulated altitude of 4000 m. Although Rf and VE varied, as expected, with increased levels in the L phase, results were not statistically significant. Furthermore, higher lateral velocities were found during the L phase only with EO. Therefore, our findings do not confirm that physical performance is altered by the MC phase.

Spirometry

Forced spirometry parameters based on anatomical features remained consistent throughout the cycle phases,

both at SL and HH (Table 3), in agreement with a previous study that found no differences in the MC phases on FVC and FEV1 (Beidleman et al. 1999). On the contrary, other studies found increased PEF rate in L (vs. F) (Sam-sudeen and Rajagopalan 2016) and a positive correlation between FVC, FEV1 and FEV1/FVC (Mannan et al. 2008) with plasma progesterone in normoxia. As expected, significant differences were found between altitudes on FEF 25–75, PEF, and PIF ($p \leq 0.0001$), because of the lower air density at the low barometric pressure of HH, where higher values were found because of reduced resistance to air convection (Netzer et al. 2022). Furthermore, a

Fig. 6 Radar plot showing the distribution of symptoms across the MC phases (menstrual, mid-luteal and premenstrual). The axes represent different symptoms. Each line corresponds to a different phase: dashed black lines for menstrual, solid red lines for mid-luteal and dotted blue lines for premenstrual

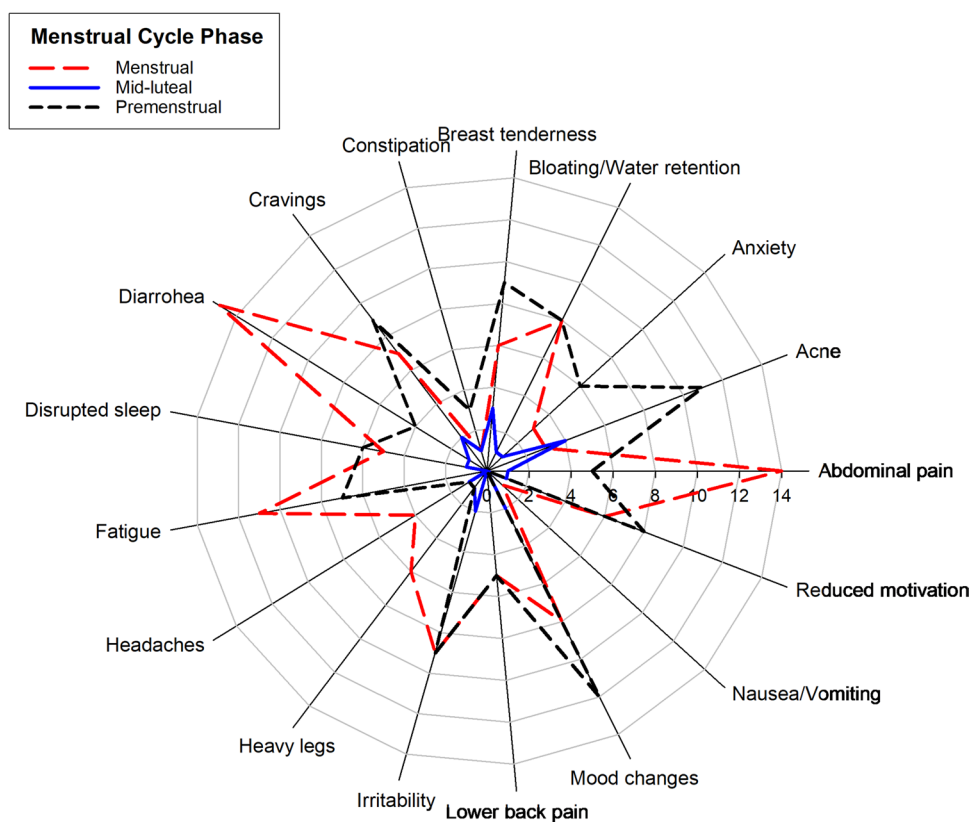
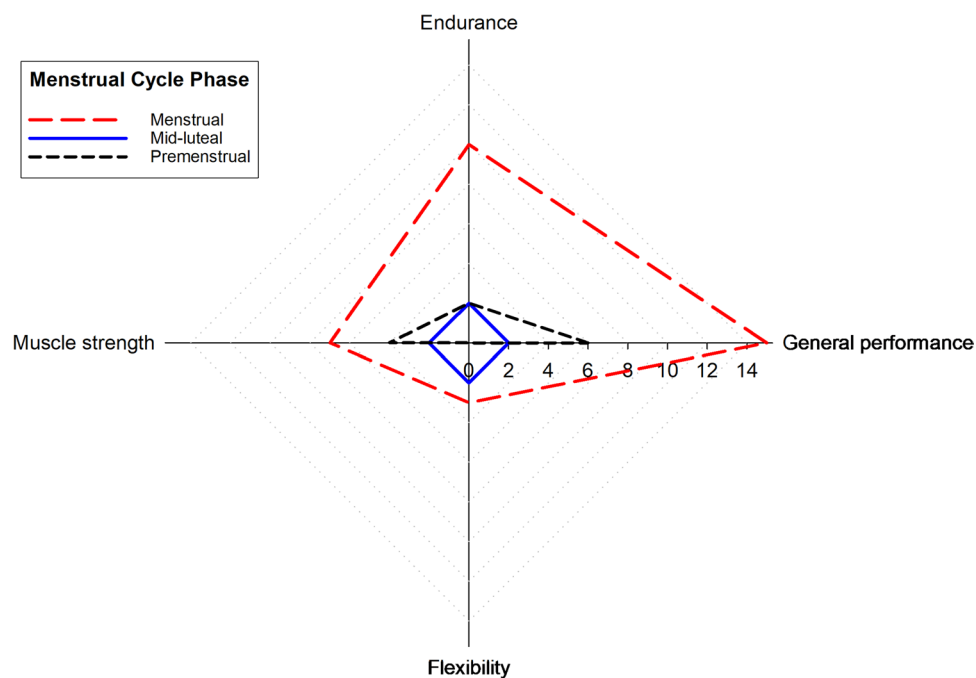


Fig. 7 Radar plot comparing the performance metrics across the MC phases (menstrual, mid-luteal and premenstrual). The axes represent muscle strength, endurance, flexibility and overall performance. Each line corresponds to a different phase, with dashed black lines for menstrual, solid red lines for mid-luteal and dotted blue lines for premenstrual



comprehensive evaluation of the relationship between the MC phases and altitudes on FEV1/FVC revealed a statistically significant association ($p = 0.0001$). Specifically, this

variable exhibited higher levels in L at HH (as compared to L and F at SL) and in F at HH (as compared to F at

SL). Furthermore, FET was reduced in the L phase at HH compared with SL ($p = 0.016$).

Cardiorespiratory responses during exercise at high altitude

No significant changes were detected between the MC phases on Rf, $\dot{V}E$, SAO_2 , HR and Borg under HH (Table 4) at the two exercise intensities. These findings are in agreement with previous reports by other authors (Dombovy et al. 1987; Beidleman et al. 1999; Takase et al. 2002; MacNutt et al. 2012; Citherlet et al. 2024a) and also at resting conditions (MacNutt et al. 2012; Citherlet et al. 2024a). Conflicting findings were found with higher $\dot{V}E$ in the L vs. the F phases during exercise at 3600 m (Brutsaert et al. 2002) and SL (Rael et al. 2021). The findings of this study contradict the results of previous research on resting $\dot{V}E$ under hypobaric hypoxia (Tagliapietra et al. 2024), but are consistent with those in normobaric hypoxia (Citherlet et al. 2024b). Several studies (Basualto-Alarcón et al. 2012; Faiss et al. 2013; Beidleman et al. 2014) have demonstrated that, under hypobaric conditions, the respiratory and cardiovascular systems do not respond in the same way as under normobaric hypoxia. This aspect has been extensively discussed (Millet and Debevec 2020; Richalet 2020). Despite the limitations of extrapolating normobaric conditions to hypobaric conditions, owing to disparities in arterial PCO_2 and plasma pH, further research is necessary to provide a more comprehensive understanding of the HVR in females. Moreover, a higher rating of perceived exertion during menses was reported as compared to other phases (Delp et al. 2023). The hypothesis of increased aerobic performance in the L phase was based on previous studies, conducted at SL, which found higher ventilation because of the effects of progesterone in this phase that enhanced the chemosensitivity of the hypothalamus chemoreceptors, lowering the threshold of the medullary respiratory centre and thus increasing ventilation (Williams and Krahenbuhl 1997; Janse de Jonge 2003; Samsudeen and Rajagopalan 2016; Goldsmith and Glaister 2020; Rael et al. 2021). This effect is enhanced by oestradiol, which is found during the mid-luteal days, increasing the number of progesterone receptors and stimulating the $\dot{V}E$ (Brodeur et al. 1986). Moreover, significant interactions of MC phases and exercise intensity were found on VT, $\dot{V}E$ and Borg ($p = 0.033$, < 0.0001 , < 0.0001 , respectively).

VT during high-intensity exercise at HH was significantly lower in the L phase (1.69 L) than in the F (1.82 L) ($p = 0.053$) with a moderate effect size (Cohen's $d = 0.506$), as shown in Fig. 2. Another study found a decrease in resting VT in the L than in the F phases (0.71 and 0.81 L; $p = 0.027$, respectively), although these results were no longer evident during exercise at high altitude (Tagliapietra et al. 2024). Contrary to this trend, Rf and $\dot{V}E$ increased in the L

phase (Figs. 3 and 4), although the results were not statistically significant with an almost moderate size effect of Rf at high altitude (Cohen's $d = 0.353$). These findings showed the respiratory female pattern with greater breathing work to compensate for the ventilation demands during exercise, probably caused by their smaller lung volumes and diameter airways (Guenette et al. 2007).

SAO_2 increased during the L compared to the F phase at HH independently of the exercise intensity ($p \leq 0.01$), with marginally significant results ($p = 0.06$ and $p = 0.090$, for low and high intensity, respectively) and moderate effect sizes at low intensity (Cohen's $d = 0.484$) and high intensity (Cohen's $d = 0.326$), as can be seen in Fig. 5. This finding is supported by other authors (Beidleman et al. 1999; Richalet et al. 2020). Surprisingly, SAO_2 increased independently of the ventilation, as was also reported previously in acute altitude exposure (Bender et al. 1989; Beidleman et al. 1999). An improvement of arterial O_2 content and transport under acute hypoxia (Beidleman et al. 1999) and an increase in pulmonary diffusion capacity (Smith et al. 2015) during the L phase could explain these results. In contrast, no changes were also found in other reports (Dombovy et al. 1987; MacNutt et al. 2012). Moreover, other authors found higher SAO_2 levels in the mid-follicular phase during exercise, but no changes at rest (Citherlet et al. 2024a).

In summary, there was no significant and systematic variation in HVR across the MC. However, it is noteworthy that female physiological particularities may exert a minor effect on respiratory function, particularly concerning VT and SAO_2 , although this effect is insufficient to impact aerobic performance (Beidleman et al. 1999). Discrepant findings between studies could be due to differences in the characteristics of the participants, sample size, type and level of hypoxia, acclimatisation status, MC determination and exercise intensities.

Blood pressure and heart rate recovery after exercise

Systolic and diastolic pressure and HR during recovery from exercise did not change significantly across the MC under HH. Similar findings have been reported at 4300 m at rest (Mazzeo et al. 1998), however, values were reported on day 2 after arrival to altitude, in contrast to this study, which was under acute hypoxia exposure. Inconsistent results have also been found at rest in normoxia (Thakrar et al. 2024; Citherlet et al. 2024a). Opposite effects on vascular tone, vasodilatory effects by oestrogens and vasoconstrictor effects by progesterone (Sarrel 1999), could explain the variable results in the literature. In agreement with a previous report (Tagliapietra et al. 2024), HR recovery rate has not changed across the MC.

Body balance control

The lateral velocity of CoP at EO increased significantly during the L phase with a moderate size effect ($p = 0.045$; Cohen's $d = 0.488$), which suggests more instability in this phase compared to the F phase (Table 5). To our knowledge, this is the first report to study the effects of MC on body balance under hypoxic conditions. Previous studies at SL are in agreement with our results showing a similar tendency with greater unbalance during the mid-luteal phase ($p = 0.06$) (Fridén et al. 2003), while others found higher lateral and anterior velocity during the ovulation phase (Lee et al. 2017; Aziz et al. 2023) and pre-ovulation period (Elvan et al. 2024). Oestrogen and progesterone receptors located in the skeletal muscle, bone, ligament and nervous system could change the structure and function of those tissues and be related to the changes in postural control and balance across the MC (Lee et al. 2017). Length, the mean velocity of CoP and anterior velocity at EO did not change between the MC phases, although moderate and small effects were found (Cohen's $d = 0.400$, 0.417 and 0.211 , respectively). This trend was also supported by other reports (Reschektko et al. 2023; Aziz et al. 2023).

Although the influence of vestibular, visual and somatosensory systems on body balance and postural control has been well described (Hall 2015; Rodrigues et al. 2017), surprisingly, our results presented a greater instability of the participants with EO, independently of the MC. It has been hypothesised that HH rapidly alters visual function, affecting the central nervous system by increasing the reaction time (Nordahl et al. 1998; Pun et al. 2018; Debenham et al. 2021) and leading to remarkable cognitive limitations (Regard et al. 1989). These alterations could justify a more unstable control of body balance with EO than EC under acute hypoxia, since at SL, the role of vision determined a better static postural balance (Tomomitsu et al. 2013), also among athletes (Hammami et al. 2014). However, there is no consistent explanation of how hypoxia can affect the sensory–motor pathways and impact neural balance control (Debenham et al. 2021).

Interactions between MC phases and eyes' condition were found on CoP track length, mean velocity of CoP, and lateral and anterior velocities ($p = 0.033$, 0.049 , 0.028 , 0.029 , respectively). Post hoc analysis revealed a reduction in postural stability during the L phase with EO (vs. F with EC) on CoP track length, the mean velocity of CoP and the lateral velocity, which aligns with previous reports (Fridén et al. 2005). Further research is required to ascertain the true implications of the menstrual cycle and female sexual hormones on body balance control in the context of acute hypoxia and visual function.

Menstrual cycle symptoms and impact on exercise performance

In our study, 18 out of 20 participants reported symptoms during the MC. The most common symptoms declared, without taking into account the phase, were abdominal pain, mood changes, diarrhoea and irritability. The mean of symptoms per menstrual cycle was 7.093. According to the phases, the premenstrual phase was the most affected with an average of 6.12 symptoms, followed by the menstrual phase with a mean of 5.89 symptoms and the mid-luteal phase with 2.75 symptoms.

During the menstrual phase, we found the most prevalent symptoms to be diarrhoea (75%, $n = 15$), abdominal pain (70%, $n = 14$) and fatigue (55%, $n = 11$), which is in line with the literature (Solli et al. 2020; Oester et al. 2024), followed by mental symptoms such as irritability (45%, $n = 9$) and mood changes (40%, $n = 8$), while other authors suggested that mental affectations are more frequent during the menstrual phase than somatic symptoms (Bruinvels et al. 2021). During the premenstrual phase, mood changes were the most prevalent symptoms (60%, $n = 12$), followed by acne, cravings, irritability, reduced motivation and bloating (Fig. 6).

In this study, 90% ($n = 18$) of the participants reported symptoms negatively affecting their sports performance. This finding is supported by the results of a recent extensive scoping review, which found between 2.8% and 100% of the athletes reported that the main reason for their perceived impact on performance was the menstrual cycle symptoms (Oester et al. 2024). The menstrual phase days were the most affected with 88.2% ($n = 15$), which aligns with previous studies (Martin et al. 2018; Solli et al. 2020; Doohan et al. 2023; McNulty et al. 2023; Taim et al. 2024) and followed by premenstrual phase days that affect negatively their performance in 35.3% ($n = 6$), while it has seen a higher prevalence (76.6%) associated with premenstrual syndrome and decreased performance (Yi and Bae 2021). This study used the term “premenstrual symptoms” to consider the affectations between one to four last days before menstruation. It should be noted that there is no consensus in the literature on the terminology used to discuss symptoms before and during menses, the most common terms being premenstrual syndrome or premenstrual symptoms (Angst et al. 2001; Oester et al. 2024). Up to 11.8% of our participants reported that the mid-luteal phase affected their performance. Likewise, it has been shown how phase 3 and phase 2 of the cycle were the least negatively affected physical activity and performance days of the cycle (Solli et al. 2020; Ekenros et al. 2022). Endurance exercise was the physical quality most affected during menstruation (83.3%, $n = 10$), followed by muscle strength (63.6%, $n = 7$), although these answers could be biased due to the participants being endurance athletes

(Fig. 7). In contrast to our study, it has been reported that muscle strength was impacted to the same extent as aerobic fitness (Ekenros et al. 2022).

A significant number of respondents (80%, $n = 16$) reported having changed their training sessions by adjusting their intensity or duration due to the symptoms, and these data are consistent with the numbers of athletes who reported symptoms during the menstrual cycle ($n = 18$). Similarly, other reports described that parts of training during the menstrual and premenstrual phases were modified due to the symptoms (Righi and Barroso 2022; Prado et al. 2022), but in contrast, in another report, only 22% of the athletes reported adapting their training due to menstrual cycle side effects, even though they reported a high incidence of abdominal pain (83%) (Solli et al. 2020). In our study, the proportion of athletes who refrain from training or competition on account of the symptoms was 40% ($n = 8$); this trend has some concordance with previous reports (Ekenros et al. 2022; McNulty et al. 2023) and contrasts with other findings (Martin et al. 2018), which reported that only 4.2% of the female athletes opted out of training or competition because of menstruation.

Despite the high number of symptoms reported in the literature across the MC, there is no consistency in the number of participants who adapt or miss training sessions. This discrepancy could be explained by different hypotheses. Probably, while female athletes can report menstrual-related symptoms, they may not view these as a significant reason to stop their training. Additionally, they seem reluctant to discuss their symptoms with their coaches (Findlay et al. 2020). Effective communication between athletes and coaches is essential to facilitate open dialogue about menstrual health and related symptoms, challenging the stigma surrounding this topic (Righi and Barroso 2022). There is a general agreement that more research is needed to delve into the relationship between symptoms and performance throughout the menstrual cycle, mainly due to the wide methodological differences found in the literature.

Almost half of the participants (47.5%) responded to the CVM- 22 questionnaire that psychological symptoms (irritability, mood changes, sadness, etc.) are present “sometimes” during their menstrual phase, followed by physical health (39%) and symptoms (27.50%) (Table 6), which does not agree with the results of the online form that showed physical symptoms as the most prevalent during the menstrual phase.

Conclusions

In summary, despite significant VT at high exercise intensity and greater SaO_2 during exercise in the L phase, as well as a potential decrease in balance in the L phase, these results

suggest that hormonal fluctuation across the MC does not markedly impact exercise performance under acute HH exposure. However, a significant interaction between MC and exercise intensity on certain cardiorespiratory parameters underpins how training load must be adjusted when female athletes train, especially under hypoxic conditions. Somatic symptoms are the most common during the menstrual days, followed by the pre-menstrual phase and 80% of our participants usually alter their training to deal with MC symptoms. These findings may have important implications for women who work or participate in athletic competitions or recreational activities involving short-term exposure to moderate or high altitudes. Further research is needed to corroborate our findings and contrast them with those from healthy sedentary women to verify how trained status might affect physiological responses to exercise and physical capacity throughout the menstrual cycle.

Acknowledgements The authors would like to express their gratitude to the women who voluntarily participated in this study, as well as to Dr. Casimiro Javierre for his help and medical supervision, and to Mr. Adrià Martí for his cooperation in obtaining some experimental data. We are also grateful to Dr. Jacob Smith for his help in editing the manuscript.

Author contribution GV and CR conceived and designed the research. GV, CR, JH and MC conducted experiments and analysed data. CR, JH and MC wrote the draft. GV edited the manuscript. All authors read and approved the manuscript in its final form.

Funding Open Access funding provided thanks to the CRUE-CSIC agreement with Springer Nature. No funding was obtained to perform this study. The funding for open access was provided by Universitat de Barcelona within Spain’s CRUE-CSIC agreement with Springer-Nature.

Data availability The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Declarations

Conflict of interest All authors declare that they have no conflicts of interest.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article’s Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article’s Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Angst J, Sellaro R, Merikangas KR, Endicott J (2001) The epidemiology of perimenstrual psychological symptoms. *Acta Psychiatr Scand* 104:110–116. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0447.2001.00412.x>
- Aziz HMA, Aziz KSA, Wahab AERHAE, El-Shafei MA (2023) Effect of ovulation on postural sway in association with sex hormone variation across the menstrual cycle in college students: an observational study. *Bull Fac Phys Ther* 28:25. <https://doi.org/10.1186/s43161-023-00136-9>
- Barba-Moreno L, Cupeiro R, Romero-Parra N et al (2022) Cardiorespiratory responses to endurance exercise over the menstrual cycle and with oral contraceptive use. *J Strength Cond Res* 36:392. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003447>
- Basualto-Alarcón C, Rodas G, Galilea PA et al (2012) Cardiorespiratory parameters during submaximal exercise under acute exposure to normobaric and hypobaric hypoxia. *Apunts Sports Med* 47:65–72. <https://doi.org/10.1016/j.apunts.2011.11.005>
- Behan M, Wenninger JM (2008) Sex steroidal hormones and respiratory control. *Respir Physiol Neurobiol* 164:213–221. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2008.06.006>
- Beideman BA, Rock PB, Muza SR et al (1999) Exercise V_E and physical performance at altitude are not affected by menstrual cycle phase. *J Appl Physiol* 86:1519–1526. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.5.1519>
- Beideman BA, Fulco CS, Staab JE et al (2014) Cycling performance decrement is greater in hypobaric versus normobaric hypoxia. *Extreme Physiol Med* 3:8. <https://doi.org/10.1186/2046-7648-3-8>
- Bender PR, McCullough RE, McCullough RG et al (1989) Increased exercise SaO₂ independent of ventilatory acclimatization at 4300 m. *J Appl Physiol Bethesda Md* 66:2733–2738. <https://doi.org/10.1152/jappl.1989.66.6.2733>
- Borg G (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 2:92–98
- Brodeur P, Mockus M, McCullough R, Moore LG (1986) Progesterone receptors and ventilatory stimulation by progestin. *J Appl Physiol Bethesda Md* 60:590–595. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.2.590>
- Bruinvels G, Goldsmith E, Blagrove R et al (2021) Prevalence and frequency of menstrual cycle symptoms are associated with availability to train and compete: a study of 6812 exercising women recruited using the Strava exercise app. *Br J Sports Med* 55:438–443. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102792>
- Brutsaert TD, Spielvogel H, Caceres E et al (2002) Exercise at altitude and the menstrual cycle. *J Exp Biol* 205:233–239. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.2.233>
- Cibella F, Cuttitta G, Kayser B et al (1996) Respiratory mechanics during exhaustive submaximal exercise at high altitude in healthy humans. *J Physiol* 494(Pt 3):881–890. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1996.sp021540>
- Citherlet T, Raberin A, Manferdelli G et al (2024a) Impact of the menstrual cycle on the cardiovascular and ventilatory responses during exercise in normoxia and hypoxia. *High Alt Med Biol* ham. <https://doi.org/10.1089/ham.2024.0048>
- Citherlet T, Raberin A, Manferdelli G et al (2024b) Menstrual cycle does not impact the hypoxic ventilatory response and acute mountain sickness prediction. *Sci Rep* 14:26087. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76404-y>
- Costello JT, Bieuzen F, Bleakley CM (2014) Where are all the female participants in sports and exercise medicine research? *Eur J Sport Sci* 14:847–851. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.911354>
- Daley A (2009) Exercise and premenstrual symptomatology: a comprehensive review. *J Womens Health* 18:895–899. <https://doi.org/10.1089/jwh.2008.1098>
- Debenham MIB, Smuin JN, Grantham TDA et al (2021) Hypoxia and standing balance. *Eur J Appl Physiol* 121:993–1008. <https://doi.org/10.1007/s00421-020-04581-5>
- Delp M, Chesbro GA, Pribble BA et al (2023) Higher rating of perceived exertion and lower perceived recovery following a graded exercise test during menses compared to non-bleeding days in untrained females. *Front Physiol* 14:1297242. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1297242>
- Dombovy ML, Bonekat HW, Williams TJ, Staats BA (1987) Exercise performance and ventilatory response in the menstrual cycle. *Med Sci Sports Exerc* 19:111
- Doohan MA, King N, White MJ, Stewart IB (2023) Trends in menstrual cycle symptoms, physical activity avoidance, and hormonal contraceptive use in a general population of adult women. *Sex Reprod Healthc* 36:100853. <https://doi.org/10.1016/j.srhc.2023.100853>
- Ekenros L, von Rosen P, Solli GS et al (2022) Perceived impact of the menstrual cycle and hormonal contraceptives on physical exercise and performance in 1086 athletes from 57 sports. *Front Physiol* 13:954760. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.954760>
- Elliott-Sale KJ, Minahan CL, de Jonge XAKJ et al (2021) Methodological considerations for studies in sport and exercise science with women as participants: a working guide for standards of practice for research on women. *Sports Med Auckl NZ* 51:843–861. <https://doi.org/10.1007/S40279-021-01435-8>
- Elvan A, Kirişçi S, Başer Seçer M et al (2024) Does phase of the menstrual cycle affect balance and postural control? *J Mot Behav* 56:69–77. <https://doi.org/10.1080/00222895.2023.2241403>
- Faiss R, Pialoux V, Sartori C et al (2013) Ventilation, oxidative stress, and nitric oxide in hypobaric versus normobaric hypoxia. *Med Sci Sports Exerc* 45:253–260. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31826d5aa2>
- Findlay RJ, Macrae EHR, Whyte IY et al (2020) How the menstrual cycle and menstruation affect sporting performance: experiences and perceptions of elite female rugby players. *Br J Sports Med* 54:1108–1113. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-101486>
- Fridén C, Hirschberg AL, Saartok T et al (2003) The influence of premenstrual symptoms on postural balance and kinesthesia during the menstrual cycle. *Gynecol Endocrinol off J Int Soc Gynecol Endocrinol* 17:433–439. <https://doi.org/10.1080/09513590312331290358>
- Fridén C, Ramsey DK, Backstrom T et al (2005) Altered postural control during the luteal phase in women with premenstrual symptoms. *Neuroendocrinology* 81:150–157. <https://doi.org/10.1159/000086592>
- Goldsmith E, Glaister M (2020) The effect of the menstrual cycle on running economy. *J Sports Med Phys Fitness* 60:610–617. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.10229-9>
- Guenette JA, Witt JD, McKenzie DC et al (2007) Respiratory mechanics during exercise in endurance-trained men and women. *J Physiol* 581:1309–1322. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.126466>
- Hall JE (2015) Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 13th edn. Saunders, Philadelphia
- Hammami R, Behm DG, Chtara M et al (2014) Comparison of static balance and the role of vision in elite athletes. *J Hum Kinet* 41:33–41. <https://doi.org/10.2478/hukin-2014-0030>
- Horakova L, Paal P, Pichler Hefti J et al (2023) Women's health at high altitude: an introduction to a 7-part series by the international climbing and mountaineering federation medical commission. *High Alt Med Biol* 24:243–246. <https://doi.org/10.1089/ham.2023.0041>
- Janse de Jonge XAK (2003) Effects of the menstrual cycle on exercise performance. *Sports Med Auckl NZ* 33:833–851. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333110-00004>

- Lebrun CM, Joyce SM, Constantini NW (2013) Effects of female reproductive hormones on sports performance. 281–322. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-314-5_16
- Lee BJ, Cho KH, Lee WH (2017) The effects of the menstrual cycle on the static balance in healthy young women. *J Phys Ther Sci* 29:1964–1966. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.1964>
- Lei T, Cotter JD, Schlader ZJ et al (2019) On exercise thermoregulation in females: interaction of endogenous and exogenous ovarian hormones. *J Physiol* 597:71–88. <https://doi.org/10.1113/JP276233>
- MacNutt MJ, De Souza MJ, Tomczak SE et al (2012) Resting and exercise ventilatory chemosensitivity across the menstrual cycle. *J Appl Physiol* 112:737–747. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00727.2011>
- Mannan S, Begum N, Begum S et al (2008) Relationship of forced vital capacity (FVC), Forced expiratory volume in first second (FEV1) and FEV1/FVC% with plasma progesterone level during different phases of normal menstrual cycle. *J Bangladesh Soc Physiol.* <https://doi.org/10.3329/jbsp.v2i0.976>
- Martin D, Sale C, Cooper SB, Elliott-Sale KJ (2018) Period prevalence and perceived side effects of hormonal contraceptive use and the menstrual cycle in elite athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 13:926–932. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0330>
- Martin D, Timmins K, Cowie C et al (2021) Injury incidence across the menstrual cycle in international footballers. *Front Sports Act Living.* <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.616999>
- Mazzeo RS, Child A, Butterfield GE et al (1998) Catecholamine response during 12 days of high-altitude exposure (4300 m) in women. *J Appl Physiol* 84:1151–1157. <https://doi.org/10.1152/jappl.1998.84.4.1151>
- McNulty KL, Ansdell P, Goodall S et al (2023) The Symptoms experienced by naturally menstruating women and oral contraceptive pill users and their perceived effects on exercise performance and recovery time posttraining. *Women Sport Phys Act J.* <https://doi.org/10.1123/wspaj.2023-0016>
- Millet GP, Debevec T (2020) CrossTalk proposal: barometric pressure, independent of PO₂, is the forgotten parameter in altitude physiology and mountain medicine. *J Physiol* 598:893–896. <https://doi.org/10.1113/JP278673>
- Möller-Nielsen J, Hammar M (1989) Women's soccer injuries in relation to the menstrual cycle and oral contraceptive use. *Med Sci Sports Exerc* 21:126–129
- Netzer NC, Rausch LK, Frieß M et al (2022) Expiratory peak flow and minute ventilation are significantly increased at high altitude versus simulated altitude in normobaria. *Life Basel Switz* 12:306. <https://doi.org/10.3390/life12020306>
- Nordahl SH, Aasen T, Owe JO, Molvaer OI (1998) Effects of hypobaric hypoxia on postural control. *Aviat Space Environ Med* 69:590–595
- Oester C, Norris D, Scott D et al (2024) Inconsistencies in the perceived impact of the menstrual cycle on sport performance and in the prevalence of menstrual cycle symptoms: a scoping review of the literature. *J Sci Med Sport* 27:373–384. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2024.02.012>
- Prado RCR, Willett HN, Takito MY, Hackney AC (2022) Impact of premenstrual syndrome symptoms on sport routines in nonelite athlete participants of summer olympic sports. *Int J Sports Physiol Perform* 18:142–147. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0218>
- Pun M, Guadagni V, Bettauer KM et al (2018) Effects on cognitive functioning of acute, subacute and repeated exposures to high altitude. *Front Physiol* 9:1131. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01131>
- Rabin A, Burtscher J, Citherlet T et al (2024) Women at altitude: sex-related physiological responses to exercise in hypoxia. *Sports Med* 54:271–287. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01954-6>
- Rael B, Alfaro-Magallanes VM, Romero-Parra N et al (2021) Menstrual cycle phases influence on cardiorespiratory response to exercise in endurance-trained females. *Int J Environ Res Public Health* 18:860. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030860>
- Regard M, Oelz O, Brugger P, Landis T (1989) Persistent cognitive impairment in climbers after repeated exposure to extreme altitude. *Neurology* 39:210–213. <https://doi.org/10.1212/WNL.39.2.210>
- Reschechtko S, Nguyen TN, Tsang M, et al (2023) Postural sway is not affected by estrogen fluctuations during the menstrual cycle. *Physiol Rep* 11:e15693. <https://doi.org/10.14814/phy2.15693>
- Richalet J-P (2020) CrossTalk opposing view: Barometric pressure, independent of PO₂, is not the forgotten parameter in altitude physiology and mountain medicine. *J Physiol* 598:897–899. <https://doi.org/10.1113/JP279160>
- Richalet J-P, Lhuissier F, Jean D (2020) Ventilatory response to hypoxia and tolerance to high altitude in women: influence of menstrual cycle, oral contraception, and menopause. *High Alt Med Biol* 21:12–19. <https://doi.org/10.1089/ham.2019.0063>
- Righi I, Barroso R (2022) Do recreationally-trained women of different ages perceive symptoms of the menstrual cycle and adjust their training according to phases? *Int J Environ Res Public Health* 19:13841. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113841>
- Rodrigues ST, Gotardi GC, Aguiar SA (2017) Effects of Vision on Postural Control in Neurologically Healthy Individuals. In: Barbieri FA, Vitória R (eds) *Locomotion and posture in older adults: the role of aging and movement disorders*. Springer International Publishing, Cham, pp 219–236
- Romero-Parra N, Barba-Moreno L, Rael B et al (2020) Influence of the menstrual cycle on blood markers of muscle damage and inflammation following eccentric exercise. *Int J Environ Res Public Health* 17:1618. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051618>
- Samsudeen N, Rajagopalan A (2016) Effect of different phases of menstrual cycle on cardio-respiratory efficiency in normal, overweight and obese female undergraduate students. *J Clin Diagn Res JCDR* 10:CC01–CC04. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2016/23080.8954>
- Sarrel P (1999) The differential effects of oestrogens and progestins on vascular tone. *Hum Reprod Update* 5:205–209. <https://doi.org/10.1093/humupd/5.3.205>
- Smith JR, Brown KR, Murphy JD, Harms CA (2015) Does menstrual cycle phase affect lung diffusion capacity during exercise? *Respir Physiol Neurobiol* 205:99–104. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2014.10.014>
- Smith ES, Weakley J, McKay AKA et al (2024) Minimal influence of the menstrual cycle or hormonal contraceptives on performance in female rugby league athletes. *Eur J Sport Sci* 24:1067–1078. <https://doi.org/10.1002/ejsc.12151>
- Solli GS, Sandbakk SB, Noordhof DA et al (2020) Changes in self-reported physical fitness, performance, and side effects across the phases of the menstrual cycle among competitive endurance athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 15:1324–1333. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0616>
- Tagliapietra G, Citherlet T, Raberin A et al (2024) Effect of menstrual cycle phase on physiological responses in healthy women at rest and during submaximal exercise at high altitude. *Sci Rep* 14:27793. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79702-7>
- Taim BC, Lye J, Suppiah HT et al (2024) Menstrual cycle characteristics, perceived impact on performance, and barriers to communication: perspectives of high-performance adolescent athletes in Singapore. *Scand J Med Sci Sports* 34:e14488. <https://doi.org/10.1111/sms.14488>
- Takase K, Nishiyasu T, Asano K (2002) Modulating effects of the menstrual cycle on cardiorespiratory responses to exercise under acute hypobaric hypoxia. *Jpn J Physiol* 52:553–560. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.52.553>

- Thakrar DB, University College Oxford, University of Oxford, High Street, Oxford, OX1 4BH, United Kingdom (2024) Blood Pressure Changes During the Normal Menstrual Cycle in Adolescent Females
- Tomomitsu MSV, Alonso AC, Morimoto E et al (2013) Static and dynamic postural control in low-vision and normal-vision adults. *Clin Sao Paulo Braz* 68:517–521. [https://doi.org/10.6061/clinics/2013\(04\)13](https://doi.org/10.6061/clinics/2013(04)13)
- Torres-Pascual C, Torrell-Vallespín S, Mateos-Pedreño E et al (2019) Desarrollo y validación del cuestionario específico de calidad de vida relacionada con la menstruación CVM-22. *Rev Cuba Obstet Ginecol* 45:48–59
- Ulrich S, Schneider SR, Bloch KE (2017) Effect of hypoxia and hyperoxia on exercise performance in healthy individuals and in patients with pulmonary hypertension: a systematic review. *J Appl Physiol Bethesda Md* 123:1657–1670. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00186.2017>
- Wehrlin JP, Hallén J (2006) Linear decrease in $\dot{V}O_{2\max}$ and performance with increasing altitude in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol* 96:404–412. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-0081-9>
- West JB, Boyer SJ, Graber DJ et al (1983) Maximal exercise at extreme altitudes on Mount Everest. *J Appl Physiol* 55:688–698. <https://doi.org/10.1152/jappl.1983.55.3.688>
- Williams TJ, Krahenbuhl GS (1997) Menstrual cycle phase and running economy. *Med Sci Sports Exerc* 29:1609–1618. <https://doi.org/10.1097/00005768-199712000-00010>
- Williams JS, Stone JC, Masood Z et al (2023) The impact of natural menstrual cycle and oral contraceptive pill phase on substrate oxidation during rest and acute submaximal aerobic exercise. *J Appl Physiol* 135:642–654. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00111.2023>
- Woorons X, Mollard P, Lamberto C et al (2005) Effect of acute hypoxia on maximal exercise in trained and sedentary women. *Med Sci Sports Exerc* 37:147–154. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000150020.25153.34>
- Yi T, Bae M (2021) Prevalence of premenstrual syndrome in Korean female national athletes and associated risk factors. *Korean J Sports Med* 39:10–18. <https://doi.org/10.5763/kjms.2021.39.1.10>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.